

VŠB –Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Dynamika jízdního kola

Bicycle Dynamics

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Student: | Tomáš Chochola |
| Vedoucí bakalářské práce: | Ing. Jaromír Široký, Ph.D. |

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Chochola**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie
Téma: **Dynamika jízdního kola**
Bicycle Dynamics
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cíl:

Na základě analýzy pohybové rovnice jízdního kola charakterizovat základní parametry ovlivňující jeho pohyb. Pro vybrané parametry navrhnout postupy k zjištění jejich hodnot pro konkrétní případ kola a jezdce a ověřit použitelnost těchto postupů a zjištěných hodnot parametrů.

1. Úvod.
2. Výběr parametrů pro posouzení dynamiky jízdního kola.
3. Návrh postupů měření a ověřování vybraných parametrů.
4. Realizace měření a ověření parametrů.
5. Výpočtové využití vybraných parametrů.
6. Technické zhodnocení řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

Cibulka, K.: Mechanika jízdního kola. Praha. ČVUT v Praze. 2004. ISBN 80-01-03016-4.
VLK, F.: Teorie a konstrukce motocyklů 1. Brno: F. Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.
Matějka, R. Vozidla silniční dopravy I. Bratislava, ALFA Bratislava, 2001.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaromír Široký, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21.05.2018



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (školní dílo).
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce.
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona.
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB – TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.05.2018



.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Chochola

Adresa trvalého pobytu autora práce: Ostrava-Nová Bělá, Františka Vantucha 689/2

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval za odborné rady a připomínky svému vedoucím bakalářské práce panu Ing. Jaromíru Širokému, Ph.D.

Seznam použitých značek a symbolů

| | |
|--|--|
| a [m/s^2] | ...zrychlení |
| b [m/s^2] | ...zpomalení |
| c [m] | ...délka hrany referenčního čtverce |
| c_x [-] | ...tvarový součinitel odporu vzduchu |
| e [m] | ...rameno valení |
| f [-] | ...součinitel odporu valení |
| F [N] | ...síla vyvinutá na pedál |
| f_h [-] | ...součinitel valivého odporu horského kola |
| F_{kazeta} [N] | ...síla na ozubeném kole kazety |
| F_{kolo} [N] | ...síla přiveden na kolo |
| F_p [N] | ...síla na ozubením kole převodníku |
| f_s [-] | ...součinitel valivého odporu silničního kola |
| F_z [N] | ...reakce tíhové síly |
| g [m/s^2] | ...tíhové zrychlení |
| G [N] | ...tíhová síla |
| h [m] | ... výška těžiště od země |
| i [-] | ...převodový poměr |
| $J_{\text{horské}}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] | ...moment setrvačnosti horského kola |
| J_{kola} [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] | ...moment setrvačnosti kola |
| $J_{\text{silniční}}$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] | ...moment setrvačnosti silničního kola |
| k [m] | ...převýšení |
| l [m] | ...rozvor kol |
| l_1 [m] | ...vzdálenost těžiště od osy otáčení předního kola |
| l_2 [m] | ...vzdálenost těžiště od osy otáčení zadního kola |
| l_a [m] | ...rozvor kol při naklonění ve vodorovné ose |
| l_{a2} [m] | ...vzdálenost těžiště od zadního kola při naklonění ve vodorovné ose |
| l_s [m] | ...délka stoupání |
| m [kg] | ...hmotnost |
| m_1 [kg] | ...zatížení přenášené předním kolem |
| m_c [kg] | ...celková hmotnost kola s cyklistou |
| M_{set} [Nm] | ...moment odporu ze zrychlení rotujících hmot |
| M_z [Nm] | ...moment síly F_z |

N_1 [N]...reakce předního kola při zatížení
 n_1 [s^{-1}]...otáčky převodníku
 N_{1a} [N]...reakce předního kola při zatížení a při naklonění
 N_2 [N]...reakce zadního kola při zatížení
 n_2 [s^{-1}]...otáčky kazety
 N_{2a} [N]...reakce zadního kola při zatížení a při naklonění
 $n_{modrá}$ [-]...počet pixelů modré barvy
 $n_{šedá}$ [-]...počet pixelů šedé barvy
 O_f [N]...odpor valení
 O_{ln} [N]...reakce v ložiskách odporu ze zrychlení rotujících hmot
 O_s [N]...odpor stoupání
 O_{vz} [N]...odpor vzduchu
 O_z [N]...odpor ze zrychlení
 O_{zp} [N]...odpor ze zrychlení posuvných hmot
 O_{zr} [N]...odpor ze zrychlení rotujících hmot
 p [m]...rozdíl výšky předního a zadního kola při naklonění
 P [W]...výkon cyklisty
 p_1 [Pa]...tlak v předním kole při zatížení
 p_2 [Pa]...tlak v zadním kole při zatížení
 Q [N]...tíhová síla kola s cyklistou
 R [m]...délka kliky pedálu
 r [m]...statický poloměr kola
 r_d [m]...dynamický poloměr kola
 r_{kazeta} [m]...poloměr ozubeného kola kazety
 $r_{př}$ [m]...poloměr kola převodníku
 S [m^2]...obsah čelní plochy
 s [m]...výška těžiště od osy otáčení kol
 $S_{c,horské}$ [m^2]...celková velikost obtisknutých stop horského kola
 $S_{c,silniční}$ [m^2]...celková velikost obtisknutých stop silničního kola
 S_{eH} [m^2]...obsah elipsy
 S_{eH} [m^2]...obsah elipsy
 $S_{eHcelkové}$ [m^2]...celkový obsah stop horského jako elipsy
 $S_{eScelkové}$ [m^2]...celkový obsah stop silničního jako elipsy

$S_{\text{horské kolo}}$ [m^2]...obsah čelní plochy pro horské kolo
 $S_{\text{modrá}}$ [m^2]...obsah modré plochy
 S_{oa} [m^2]...velikost plochy stopy
 s_{os} [-]...stoupání
 $S_{\text{přední (horské)}}$ [m^2]...velikost obtisknuté stopy předního horského kola
 $S_{\text{přední (silniční)}}$ [m^2]...velikost obtisknuté stopy předního silničního kola
 $S_{\text{silniční kolo}}$ [m^2]...obsah čelní plochy pro silniční kolo
 $S_{\text{šedá}}$ [m^2]...obsah šedé plochy
 s_z [m]...dráha ujetá při výběhové zkoušce
 $S_{\text{zadní (horské)}}$ [m^2]...velikost obtisknuté stopy zadního horského kola
 $S_{\text{zadní (silniční)}}$ [m^2]...velikost obtisknuté stopy zadního silničního kola
 t [s]...doba jízdy
 T [s]...perioda kmitů
 u [m]...délka ramene kyvadla
 v [m/s]...náporová rychlost
 x [m]...velikost hlavní poloosy elipsy
 y [m]...velikost vedlejší poloosy elipsy
 z_1 [-]...počet zubů ozubeného kola převodníku v záběru
 z_2 [-]...počet zubů ozubeného kola kazety v záběru
 α [$^\circ$]...úhel stoupání
 ε [s^{-2}]...úhlové zrychlení
 η [-]...účinnost
 ρ [kg/m^3]...hustota vzduchu
 ω [rad/s]...úhlová rychlost

Seznam tabulek a obrázků

Tabulky:

- Tab. 1 Zpomalení – horské kolo
- Tab. 2 Součinitel odporu valení – horské kolo
- Tab. 3 Zpomalení – silniční kolo
- Tab. 4 Součinitel odporu valení – silniční kolo
- Tab. 5 Přehled výsledků

Obrázky:

- Obr. 1 Posunutí F_z
- Obr. 2 Moment M_z
- Obr. 3 Odpor valení O_f
- Obr. 4 Odpor sklonu O_s
- Obr. 5 Čelní plocha S
- Obr. 6 Působení O_{vz} [10]
- Obr. 7 Odpor zrychlení rotujícího kola
- Obr. 7 Odpor zrychlení rotujícího kola
- Obr. 9 Znázornění měření
- Obr. 10 Čelní plocha
- Obr. 11 Obrys čelní plochy – horské kolo
- Obr. 12 Čelní plocha – horské kolo
- Obr. 13 Histogram – horské kolo
- Obr. 14 Počet pixelů – horské kolo
- Obr. 15 Čelní plocha – silniční kolo
- Obr. 16 Počet pixelů – silniční kolo
- Obr. 17 Horské kolo – obtisk předního kola
- Obr. 18 Horské kolo – obtisk zadního kola
- Obr. 19 Horské kolo – přední kolo
- Obr. 20 Horské kolo – zadní kolo
- Obr. 21 Horské kolo – přední (pixely)
- Obr. 22 Horské kolo – zadní (pixely)
- Obr. 23 Rozměry stop – horské kolo

- Obr. 24 Vzorek silničního kola (přerdní)
- Obr. 25 Silniční kolo – obtisk předního kola
- Obr. 26 Silniční kolo – obtisk zadního kola
- Obr. 27 Silniční kolo – přední kolo
- Obr. 28 Silniční kolo – zadní kolo
- Obr. 29 Silniční kolo – přední (pixely)
- Obr. 30 Silniční kolo – zadní (pixely)
- Obr. 31 Rozměry stop – silniční kolo
- Obr. 32 Konektor autozásuvky a USB redukce
- Obr. 33 Upevnění PerformanceBox
- Obr. 34 Upevnění GPS a power banky
- Obr. 35 DriftBox Tools – horské kolo
- Obr. 36 Decel results – horské kolo
- Obr. 37 DriftBox Tools – silniční kolo
- Obr. 38 Decel results – silniční kolo

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Chochola, T. *Dynamika jízdního kola: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2018, 65 s, Vedoucí práce: Ing. J. Široký Ph.D.

Tato bakalářská práce se zabývá vybranými parametry ovlivňující dynamiku pohybu jízdního kola. První část práce je zaměřena na analýzu jednotlivých odporů ovlivňující jízdu kola. V další části jsou shrnuty možné postupy zjišťování jednotlivých parametrů. Některé z těchto postupů jsou v bakalářské práci použity pro určení vybraných parametrů ovlivňujících jízdu kola. V poslední části práce jsou naměřené parametry využity pro vypočítání potřebného výkonu cyklisty při jízdě v různých podmínkách.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

Chochola, T, *Bicycle Dynamics*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, The Institute of Transport, 2018, 65 p, Thesis head: Ing. J. Široký Ph.D.

This bachelor thesis deals with parameters affecting the dynamics of bicycle movement. The first part of the thesis focuses on the analysis of individual resistance components which affect the bicycle movement. In the next section, possible approaches for determining individual parameters are summarized. In this bachelor thesis, some of those processes are used to determine selected parameters affecting bicycle movements. In the last section, measured parameters are used to calculate the performance of a cyclist riding in different conditions.

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitých značek a symbolů | 6 |
| Seznam tabulek a obrázků | 9 |
| Úvod | 14 |
| 1. Výběr parametrů pro posouzení dynamiky jízdního kola | 15 |
| 1.1 Odpor sklonu vozovky | 15 |
| 1.2 Valivý odpor | 16 |
| 1.3 Odpor vzduchu | 18 |
| 1.4 Odpor ze zrychlení | 19 |
| 1.5 Řetězový převod..... | 21 |
| 1.6 Sestavení pohybové rovnice | 22 |
| 2. Návrh postupů měření a ověřování vybraných parametrů..... | 24 |
| 2.1 Určení pozice těžiště cyklisty | 24 |
| 2.2 Zjištění odporu vzduchu O_{vz} | 26 |
| 2.2.1 Určení tvarového součinitele c_x | 26 |
| 2.2.2 Měření velikosti čelní plochy cyklisty | 26 |
| 2.3 Zjištění velikosti plochy stopy kola..... | 27 |
| 2.4 Určení velikosti součinitele odporu valení | 28 |
| 3. Realizace měření a ověření parametrů | 30 |
| 3.1 Změření a výpočet polohy těžiště | 30 |
| 3.1.1 Výpočet polohy těžiště horského kola v ose x | 30 |
| 3.1.2 Výpočet polohy těžiště horského kola v ose y | 31 |
| 3.1.3 Výpočet polohy těžiště silničního kola v ose x | 31 |
| 3.1.4 Výpočet polohy těžiště silničního kola v ose y | 32 |
| 3.2 Výpočet čelní plochy jezdce na kole | 32 |
| 3.2.1 Výpočet čelní plochy jezdce na horském kole | 33 |
| 3.2.2 Výpočet čelní plochy jezdce na silničním kole | 35 |
| 3.3 Výpočet plochy stopy | 37 |
| 3.3.1 Výpočet plochy stop horského kola | 37 |
| 3.3.2 Stopa horského kola jako elipsa..... | 40 |
| 3.3.3 Výpočet plochy stop silničního kola | 41 |
| 3.3.4 Stopa silničního kola jako elipsa..... | 44 |
| 3.4 Měření a výpočet součinitele odporu valení..... | 45 |
| 3.4.1 Valivý součinitel horského kola | 46 |
| 3.4.2 Valivý součinitel silničního kola..... | 49 |
| 4. Výpočtové využití vybraných parametrů | 53 |
| 4.1 Jízda po rovině konstantní rychlostí 30 km/h | 54 |

| | |
|---|----|
| 4.2 Jízda po rovině konstantní rychlostí 30 km/h proti větru | 55 |
| 4.3 Jízda po rovině konstantní rychlostí 40 km/h | 56 |
| 4.4 Jízda po rovině konstantní rychlostí 40 km/h proti větru | 57 |
| 4.5 Jízda konstantní rychlostí 20 km/h na stoupání 10% proti větru..... | 58 |
| 4.6 Jízda konstantní rychlostí 30 km/h na stoupání 10% proti větru..... | 60 |
| 4.7 Zrychlování na 35 km/h..... | 61 |
| 5. Technické zhodnocení řešení | 63 |
| 6. Seznam použité literatury | 66 |

Úvod

Cílem této bakalářské práce je analyzovat pohybovou rovnici jízdního kola, navrhnout postupy měření jednotlivých veličin ovlivňující jízdu kola a postupy ověřit na vybraných veličinách.

Vybranými parametry, které ve své bakalářské práci zjišťuji, jsou čelní plocha cyklisty sedícím na kole, velikost stopy jízdního kola, polohou těžiště a součinitelem odporu valení.

Existuje mnoho publikací zabývajících se pohybem jak automobilů, tak motocyklů, ale pouze ojediněle lze najít publikace zabývající se pohybem jízdního kola, proto ve své bakalářské práci budu ověřovat postupy měření veličin pro dva různé typy jízdních kolo, konkrétně na klasickém silničním kole, a dnes velmi oblíbeném horském kole.

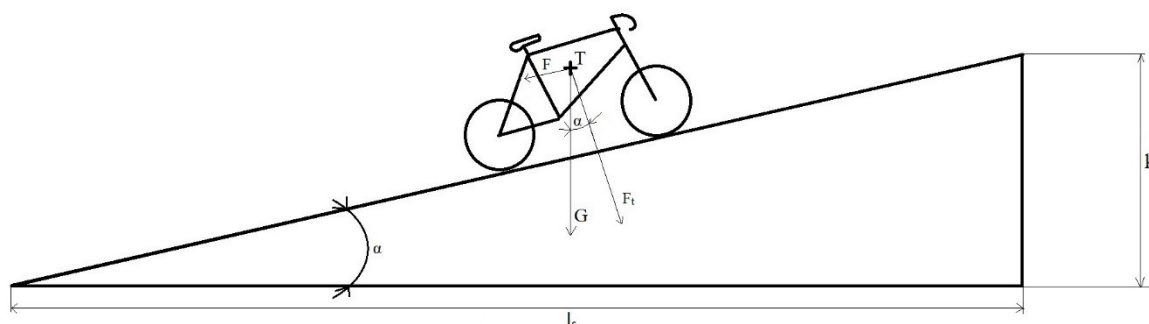
1. Výběr parametrů pro posouzení dynamiky jízdního kola

1.1 Odpor sklonu vozovky

Při jízdě jakéhokoliv vozidla, ať už železničního, silničního, či bicyklu, na vozidlo působí gravitační síla a tím vozidlo na klesání urychluje, nebo na stoupání zpomaluje. Při jízdě cyklisty po stoupání musí cyklista tuto sílu překonat, a proto se zavádí tzv. odpor stoupání.

Pokud je nám známý výškový rozdíl dvou bodů, mezi kterými cyklista projíždí a hmotnost cyklisty i s kolem, potom můžeme za předpokladu rovnoměrného stoupání pod stejným úhlem určit odpor stoupání O_s , který musí cyklista překonat.

Tíhovou sílu G rozložíme na složku rovnoběžnou s podložkou (síla F) a složku, jež je kolmá k podložce (síla F_t). (viz obr 4)



Obr. 4 Odpor sklonu O_s

Odpor stoupání O_s odpovídá síla F , jež lze vypočítat podle vzorce:

$$F = G \cdot s_{os} \cdot 10^{-2} \text{ [N]} \quad (1.1.1)$$

Kde $s_{os} \cdot 10^2$ odpovídá poměru převýšení h a délky l_s , na které cyklista dosáhne tohoto převýšení.

$$s_{os} = \frac{k}{l_s} \cdot 10^2 = \tan \alpha \cdot 10^2 \text{ [%]} \quad (1.1.2)$$

Výše zmíněný vzorec lze použít pro úhly $\alpha \leq 5,5^\circ$, jelikož tangenciální hodnoty nabývají velmi malých hodnot. Pro úhly $\alpha \geq 5,5^\circ$ se proto využívá přesnější výpočet dle vzorce:

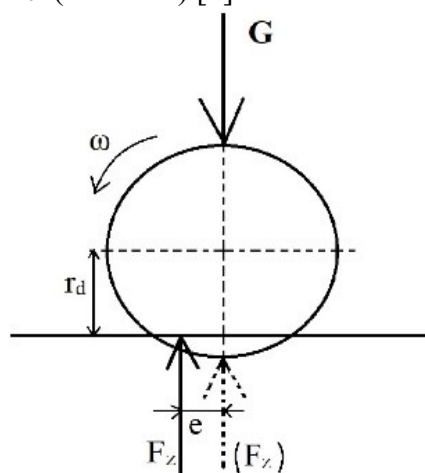
$$F = G \cdot \sin \alpha = O_s \text{ [N]} \quad (1.1.3)$$

Při jízdě z kopce tento odpor nepůsobí proti směru jízdy, ale naopak ve směru pohybu, čímž snižuje sílu potřebnou k jízdě. [1]

1.2 Valivý odpor

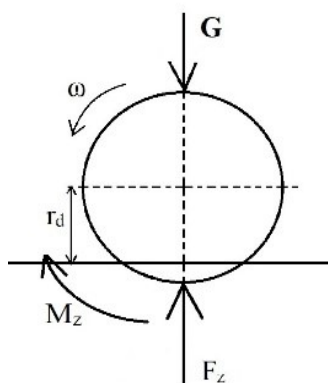
Při odvalování kola po podložce dochází k deformaci jak podložky, tak pneumatiky složené z nafouknuté duše a pláště tvořeného textilní kostrou a pryžovou směsí. Velikost deformací závisí na tuhosti stykových ploch. Při jízdě po silnici dochází pouze k deformaci pneumatiky kola. V měkkém terénu potom valivý odpor silně ovlivňuje deformace podložky.

Styková plocha pláště a podložky se nazývá stopou, která má přibližně elipsovitý tvar. Při valení poměrně měkkého kola dochází ke stlačování pláště v přední části stopy a zpětnému návratu do původního tvaru v zadní části stopy. Deformací pláště vzniká rameno e , na kterém působí síla F_z , jež je reakcí podložky na jedno kolo způsobenou tíhovou silou G a dynamický poloměr kola r_d . (viz obr.1) [2]



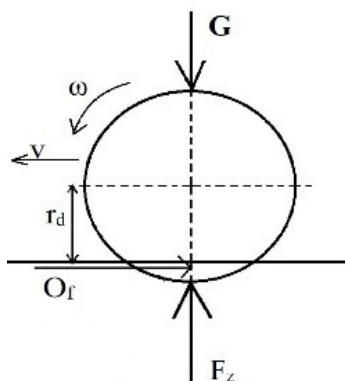
Obr. 1 Posunutí F_z

Posunutím reakce F_z o rameno valení e vzniká silová dvojice dvou stejně velikých sil F_z a G působících na rameni e . Pokud reakční sílu F_z posuneme zpět do roviny s tíhovou silou G , potom pro dosažení rovnovážného stavu musíme zavést moment M_z . (viz obr. 2)



Obr. 2 Moment M_z

Moment M_z působící na podložku vyvolává reakci O_f v rovně podložky, působící proti směru pohybu kola (viz obr 3). Reakci O_f potom můžeme považovat za odpor valení.



Obr. 3 Odpor valení O_f

$$e \cdot F_z = M_z = O_f \cdot r_d$$

$$(1.2.1)$$

↓

$O_f = F_z \cdot \frac{e}{r_d} [N]$... odpor valení jednoho kola kde $\frac{e}{r_d} = f$, přičemž f je součinitel odporu valení

↓

$$O_f = \sum F_{zi} \cdot f = G \cdot f [N]$$
... valivý odpor pro jízdu po rovině

↓

$$O_f = G \cdot f \cdot \cos \alpha [N]$$
...valivý odpor, kde α je úhel stoupání podložky

$$(1.2.2)$$

Valivý odpor je kvůli opakujícím se deformacím závislý na rychlosti otáčení kola a tím pádem i na rychlosti jakou se cyklista pohybuje. Při vyšších rychlostech nad 80 km/h se kolo začíná otáčet příliš rychle a deformace vzniklé stlačením kola se nestíhají vyrovnávat. Tento problém ve většině případů nenastává, jelikož průměrná rychlost cyklistů na silničních závodech se pohybuje mezi 35 km/h a 45 km/h (průměrná rychlost jízdy běžného cyklisty je 25 km/h až 30 km/h). Valivý odpor však začíná narůstat při prudkých, nebo dlouhých sjezdech, kdy například jezdcí Tour de France dosahují rychlostí blízkých se 100 km/h. [6]

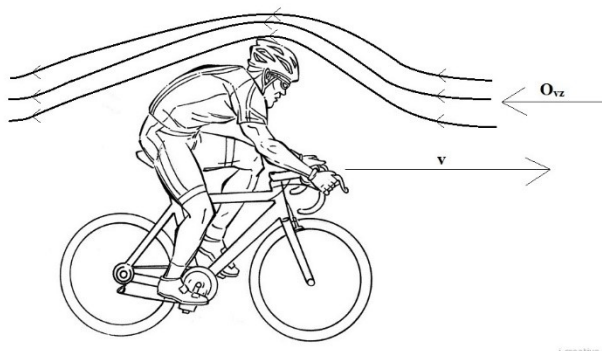
Největší vliv na velikost valivého odporu má povrch stykových ploch a jejich tuhost, respektive míra nahuštění duše kola, použitá směs na výrobu pláště a teplota provozu. Čím nižší nahuštění a měkčí materiál podložky, tím větší je hodnota valivého odporu.

Ale extrémně vysoké hodnoty nahuštění se běžně nepoužívají kvůli pohodlí cyklisty, protože duše s pláštěm plní funkci tlumení drobných nerovností, také nahuštění horských kol bývá nižší než nahuštění kol silničních, aby se dosáhlo lepší průchodnosti terénem a zvýšila se hodnota adheze a tím i lepšího záběru kola v měkkém terénu.

1.3 Odpor vzduchu

Dalším velmi důležitým faktorem ovlivňující jízdu kola je odpor prostředí, jímž se cyklista pohybuje. Tímto prostředím téměř vždy bývá vzduch, a proto jej nazýváme odporem vzduchu (aerodynamický odpor). Velikost odporu vzduchu O_{vz} je ovlivněna zejména rychlostí, jakou se cyklista pohybuje a rychlostí větru.

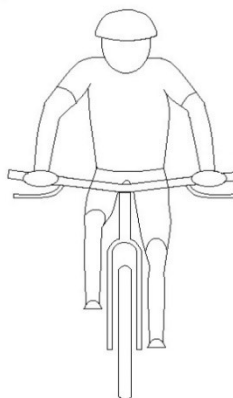
V případě, kdy vítr fouká proti směru pohybu cyklisty, potom musíme rychlost větru a rychlost pohybu cyklisty sečíst, abychom dostali výslednou tzv. náporovou rychlost v . Pokud vítr fouká cyklistovi do zad, potom se rychlosti odečítají a výsledný odpor vzduchu je podstatně menší.



Obr. 6 Působení O_{vz} [10]

Aerodynamický odpor dále závisí částečně na rozměrech jízdního kola a jeho konstrukčním řešení. Ale hlavně na rozměrech cyklisty a jeho posedu na kole.

Při určování velikosti odporu nás zejména zajímají rozměry čelní plochy, abychom byli schopni spočítat její obsah S (viz obr 5), a součinitel tvaru c_x , který udává schopnost objekty být obtékán vzduchem (případně jiným prostředím).



Obr. 5 Čelní plocha S

Dalším faktorem je hustota vzduchu ρ , která je ovlivněna nadmořskou výškou a teplotou. Odpor vzduchu lze potom vypočítat podle vzorce:

$$O_{vz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 \text{ [N]} \quad (1.3.1)$$

Přičemž hustota vzduchu ρ udáváme v kg/m^3 , obsah čelní plochy S v m^2 a rychlost v udáváme v m/s a tvarový součinitel c_x je bezrozměrný. Ze vzorce je patrné, že odpor vzduchu je závislý na kvadrátu rychlosti, což znamená že závislost není lineární, ale exponenciální. [3]

1.4 Odpor ze zrychlení

Tento odpor (někdy nazývaný setrvačný) zpomaluje pohyb při rozjezdu, působí tedy proti směru jízdy. Při brzdění působí ve směru jízdy a tím navyšuje potřebnou brzdnou sílu. Setrvačný odpor O_z vzniká při změně rychlosti pohybu a skládá se ze složek odporu posuvného zrychlení O_{zp} a odporu zrychlení rotujících hmot O_{zr} . [4]

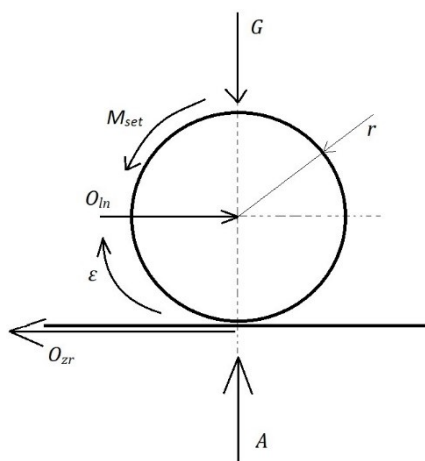
$$O_z = O_{zp} + O_{zr} \text{ [N]} \quad (1.4.1.)$$

Odpor ze zrychlení posuvných hmot lze vypočítat dle vzorce:

$$O_{zp} = m \cdot a \text{ [N]} \quad (1.4.2)$$

Kde a je hodnota posuvného zrychlení $[m/s]$ a m je hmotnost kola a cyklisty $[kg]$.

Odpor ze zrychlení pro účely méj bakalářské práce je složen ze složky dvou rotujících kol.



Obr. 7 Odpor zrychlení rotujícího kola

Z momentové věty podle obrázku Odpor zrychlení rotujících hmot, lze odpor vyjádřit jako:

$$O_{zr} \cdot r = M_{set} \quad (1.4.3)$$

$$O_{zr} = \frac{M_{set}}{r} [N]$$

Kdy moment M_{st} je roven součinu úhlového zrychlení ε a momentu setrvačnosti J_{kol} .

$$M_{set} = \varepsilon \cdot J_{kol} [N/m] \quad (1.4.4)$$

Po dosazení do rovnice dostáváme tvar:

$$O_{zr} = \frac{\varepsilon \cdot J_{kol}}{r} [N]$$

Úhlové zrychlení lze přepsat na tvar:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} [s^{-2}]$$

Dosazením do rovnice odporu získáme tvar:

$$O_{zr} = \frac{\frac{a}{r} \cdot J_{kol}}{r} [N] \Rightarrow O_{zr} = J_{kol} \cdot \frac{a}{r^2}$$

Konečný tvar rovnice odporu ze zrychlení pro dvě kola:

$$O_{zr} = J_{kol} \cdot \frac{a}{r^2} \cdot 2 [N] \quad (1.4.5)$$

Pro započítání odporů ze zrychlení všech ozubených kol je nutný vzorec:

$$O_{zr} = J_{ozub} \cdot \frac{a}{r^2}, \text{ pro každé ozubené kolo zvlášť.}$$

Síla O_{ln} je reakcí odporu O_{zr} na ložiska: $O_{ln} - O_{zr} = 0$

Finální rovnice odporu ze zrychlení, bez započítání odporu rotačních hmot pro jednotlivá ozubená kola má tvar:

$$O_z = m \cdot a + J_{kol} \cdot \frac{a}{r^2} \cdot 2 [N] \quad (1.4.6)$$

1.5 Řetězový převod

Zdrojem hnací síly u jízdních kol je síla, kterou cyklista působí na pedály a roztáčí středové ozubené kolo (tzv. převodník). Dnes je centrální systém ozubených kol tvořen třemi různě velikými převodníky (tvoří tzv. talíř), čímž se zvyšuje počet převodů. Nejčastější počty zubů převodníků jsou 52, 48, 44, 38, 36, 34, 32, 28, 26 a 22. Kombinace velikostí ozubených kol je omezena schopností přesmykače přetlačit řetěz z malého kola na kolo větší. A proto se pro běžnou rekreační jízdu doporučuje kombinace 22-32-42. [8]

Hnací síla je pomocí řetězu přenášena na zadní kolo, kde se nachází systém ozubených kol (tzv. kazeta, nebo vícekolečko). Počet ozubených kol zvyšuje počet použitelných převodů. Dnes se používají šesti až dvanácti stupňové systémy kazet s rozsahy od 11 až po 36 zubů.

Při jízdě se doporučuje řadit ozubené kolo s nejmenším počtem zubů na talíři a první, druhé a třetí ozubené kolo s největším počtem zubů na vícekolečku. Při zařazeném ozubeném kole s nevyšším počtem zubů na talíři se doporučují naopak tři nejmenší kolečka na kazetě, střední ozubené kolo na talíři potom kryje zbývající ozubená kola na kazetě. V opačných případech dochází k příliš velkému příčnému namáhání řetězu, na které není konstruován a dochází k opotřebení jak řetězu, tak jednostranné opotřebení zubů na jednotlivých ozubených kolech.

Použití řetězového převodu u jízdních kol má tu výhodu, že na rozdíl od jiných způsobů převodu momentu nedochází k prokluzu, moment lze přenést na potřebnou vzdálenost (± 1 m), při správném používání a údržbě má vysokou životnost. Jelikož se používá poměrně levný válečkový řetěz, tvořený tzv. vnitřními a vnějšími články spojenými čepy, na kterých jsou nasazeny otočné válečky. Při pohybu řetězu dochází ke tření mezi jednotlivými částmi a vzniku ztrát. Velikost ztrát u udržovaného převodu je udávána jako 2 %, což odpovídá účinnosti $\eta = 98\%$. [7]

Velikost momentu převedeného z převodníku na kazetu závisí na velikosti převodového poměru i , který lze vypočítat podle poměrů otáček vstupu n_1 a výstupu n_2 ($i = \frac{n_1}{n_2}$), nebo vhodněji poměrem zubů výstupu z_2 a vstupu z_1 ($i = \frac{z_2}{z_1}$).

1.6 Sestavení pohybové rovnice

Sestavením pohybové rovnice dostaneme požadovanou hnací sílu na kolo F_{kolo} . Tato síla je potřebná pro jízdu rychlostí v , za předpokladu působení odporů.

$$F_{kolo} = O_s + O_f + O_{vz} + O_z \text{ [N]} \quad (1.6.1)$$

O_s ...Odpor sklonu vozovky $O_s = G \cdot \sin \alpha \text{ [N]}$

O_f ...Valivý odpor $O_f = G \cdot f \cdot \cos \alpha \text{ [N]}$

O_{vz} ...Odpor vzduchu $O_{vz} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 \text{ [N]}$

O_z ...Odpor ze zrychlení $O_z = m \cdot a + J_{kol} \cdot \frac{a}{r^2} \cdot 2 \text{ [N]}$

Po dosazení proto dostáváme rovnici ve tvaru:

$$F_{kolo} = G \cdot \sin \alpha + G \cdot f \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 + m \cdot a + J_{kol} \cdot \frac{a}{r^2} \cdot 2 \text{ [N]} \quad (1.6.2)$$

Síla, která je potřeba provést na kazetu zadního kola lze vypočítat podle následující rovnice:

$$F_{kazeta} = \frac{F_{kolo} \cdot r}{r_{kazeta}} \text{ [N]} \quad (1.6.3)$$

Pro zjištění síly F_p , kterou musí cyklista přenést na ozubené kolo předního převodníku, je nutno sílu F_k navýšit o procento ztrát v řetězu (účinnosti převodu η) a započítat převodový poměr i .

$$F_p = F_{kazeta} \cdot i \cdot \frac{1}{\eta} \text{ [N]} \quad (1.6.4)$$

Z momentové rovnice na předním převodníku lze následně získat potřebnou sílu F , kterou cyklista působí na pedál.

$$F \cdot R = F_p \cdot r_{př}$$

$$F = \frac{F_p \cdot r_{př}}{R} [N] \quad (1.6.4)$$

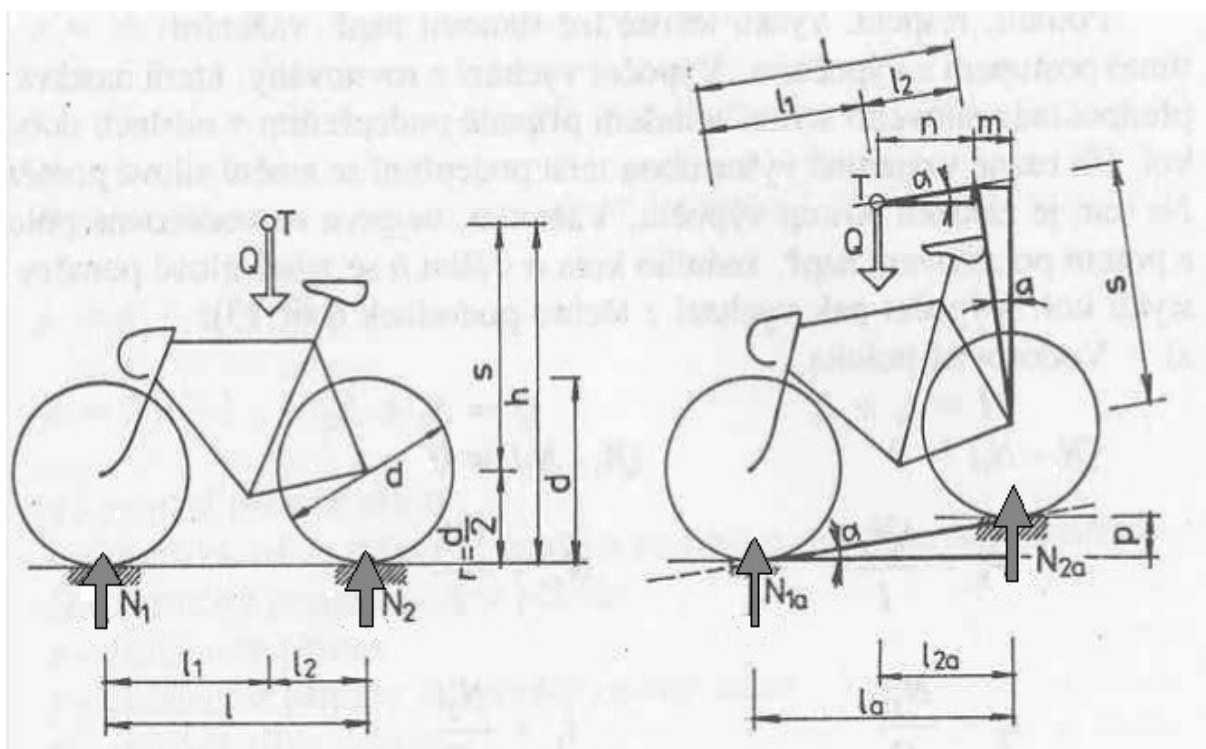
Kde $r_{př}$ je poloměr ozubeného kola převodníku, v aktuálním záběru a R délka kliky pedálu.

2. Návrh postupů měření a ověřování vybraných parametrů

2.1 Určení pozice těžiště cyklisty

Pro určení některých parametrů ovlivňující jízdu jízdního kola je důležité určit polohu těžiště. A to, jak výšku těžiště, tak horizontální polohu, pro různé typy jízdních kol, protože posedy na jednotlivých typech kol jsou odlišné. Poloha těžiště závisí zejména na výše zmíněném typu kola, dále na výšce cyklisty a částečně na stavbě těla cyklisty (tento parametr je však velice obtížné kvantifikovat).

Těžiště můžeme vypočítat podle následujícího postupu za předpokladu, že síly a momenty jsou v rovnováze. Jízdní kolo s cyklistou se nejprve v místech dotyku kol s podložkou zváží ve vodorovné poloze a následně v poloze šikmé (viz Obr. 8). Z rovnováhy momentů se vypočítají vzdálenosti l_1 a l_2 . Následně je proveden výpočet pro šikmou plochu a výška těžiště s vůči ose otáčení kol. Přičtením poloměru kola r k výšce s dostaneme výšku těžiště od podložky h . [5]



Obr. 8 Poloha těžiště [11]

Postup řešení pro vodorovnou polohu:

$$Q \cdot l_1 - N_2 \cdot l = 0 \dots \text{momentová rovnice pro přední kolo}$$

$$Q \cdot l_2 - N_1 \cdot l = 0 \dots \text{momentová rovnice pro zadní kolo}$$

↓

$$l_1 = \frac{N_2 \cdot l}{Q} [m] \dots \text{Vzdálenost těžiště od osy otáčení předního kola}$$

$$l_2 = \frac{N_1 \cdot l}{Q} [m] \Rightarrow N_1 = \frac{Q \cdot l_2}{l} [N] \quad (2.1.1)$$

Postu řešení pro šikmou plochu:

$$l_a = l \cdot \cos \alpha [m]$$

$$n = l_2 \cdot \cos \alpha [m]$$

$$m = s \cdot \sin \alpha [m]$$

$$l_{2a} = n + m [m]$$

$$N_{1a} \cdot l_a = Q \cdot l_{2a}$$

$$l_{2a} = l_2 \cdot \cos \alpha + s \cdot \sin \alpha [m]$$

$$N_{a1} = \frac{l_{2a} \cdot Q}{l_a} [N] \dots \text{reakce působící síly na přední kolo} \quad (2.1.2)$$

Rozepsáním rovnice dostáváme tvar:

$$N_{1a} = \frac{Q \cdot (l_2 \cdot \cos \alpha + s \cdot \sin \alpha)}{l \cdot \cos \alpha} [N]$$

$$N_{1a} = \frac{Q \cdot l_2 \cdot \cos \alpha}{l \cdot \cos \alpha} + \frac{Q \cdot s \cdot \sin \alpha}{l \cdot \cos \alpha} [N]$$

$$N_{1a} = \frac{Q \cdot l_2}{l} + \frac{Q \cdot s}{l} \cdot \tan \alpha [N] \quad , \text{ kde } \left(\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \right)$$

Dosazením N_1 z případu ve vodorovné poloze dostáváme tvar:

$$N_{1a} = N_1 + \frac{Q \cdot s}{l} \cdot \tan \alpha [N]$$

Osamostatněním hledané výšky těžiště s vychází tvar rovnice:

$$s = \frac{N_{1a} - N_1}{Q \cdot \tan \alpha} \cdot l [m] \quad (2.1.3)$$

Přičtením poloměru kola r dostáváme výšku těžiště nad podložkou.

$$h = s + r [m] \quad (2.1.4)$$

2.2 Zjištění odporu vzduchu O_{vz}

2.2.1 Určení tvarového součinitele c_x

Velikost tvarového součinitele lze nejlépe určit experimentálně za použití aerodynamických tunelů a výpočetní techniky. Díky řízenému proudění vzduchu kolem objektu, v našem případě jízdního kola s cyklistou, nebo jeho modelu, lze změřit, jakou silou působí na měřený objekt obtékající vzduch. V případě použití modelu je nutné, aby vzduch obtékal vyšší rychlostí, jejíž velikost odpovídá poměrovým hodnotám modelu a skutečného objektu.

Za předpokladu, že jsou známy hodnoty hustoty čelní plochy zkoumaného předmětu, hustota vzduchu, síla obtékajícího vzduchu působícího na předmět (O_{vz}) a rychlost obtékání lze z rovnice odporu vzduchu (viz rovnice 1.3.1) dopočítat koeficient odporu prostředí c_x .

$$c_x = \frac{2 \cdot O_{vz}}{S \cdot v^2 \cdot \rho} [-] \quad (2.2.1)$$

Další výhodou použití aerodynamických tunelů je možnost pozorování obtékání vzduchu okolo předmětu. Před zkoumaný předmět je vložen zdroj kouře, který je unášen proudícím vzduchem a vytváří pro oko viditelné proudění. Díky tomuto zviditelnění lze pozorovat turbulence, které zvyšují hodnotu koeficientu odporu prostředí a tím pádem zvyšují velikost odporu vzduchu. Na základě zjištěných míst vzniku turbulencí lze navrhnout úpravy tvaru a snížení velikosti tvarového součinitele. [9]

2.2.2 Měření velikosti čelní plochy cyklisty

Určení velikosti čelní plochy je nedílnou součástí pro zjištění velikosti odporu prostředí. Za použití výpočetní techniky je možné tuto plochu zjistit několika způsoby.

Nejjednodušším způsobem, výpočtu obsahu čelní plochy, je přibližné změření čelních rozměrů jízdního kola se sedícím cyklistou a následné zjednodušení na základní geometrické tvary. Součtem velikostí obsahů jednotlivých částí dostáváme přibližnou hodnotu celkové čelní plochy. Tento postup je velmi nepřesný a je vhodný pouze pro znázornění problematiky.

Jednou z dalších možností je využití grafického editoru (např. AutoCAD). V tomto případě je nutné fyzicky čelní rozměry kola a sedícího cyklisty změřit. Se znalostí rozměrů lze ve vybraném grafickém editoru nakreslit obrys jízdního kola se sedícím cyklistou a využít funkce editoru, jenž je schopna vypočítat plochu ohraničenou nakresleným obrysem. Tento postup však není úplně vhodný, jelikož měření a kreslení nepravidelných tvarů sedícího cyklisty je velmi náročné a lze předpokládat vznik mnoha nepřesností.

Pravděpodobně nejvýhodnějším a nejpraktičtějším způsobem, jak zjistit obsah čelní plochy, je promítnutí na kontrastní pozadí s referenčními body. Vyfocení tohoto promítnutého obrazce získáme podklad pro práci v grafických editorech (např. GIMP). Následný postup závisí na konkrétním editoru. Vybráním referenčního obrazce, jehož rozměry jsou nám známy a vybráním promítnuté plochy, lze dopočítat potřebnou plochu. Tyto programy přepočítávají známý rozměr referenčních obrazců (bodů) na počet pixelů. Díky získanému poměru pixelů a skutečných rozměrů je jednoduché získat plochu promítaného obrazce (jelikož je znám počet pixelů uvnitř vybrané plochy promítnutého obrazce).

2.3 Zjištění velikosti plochy stopy kola

Při odvalování kola po podložce dochází k vytvoření deformace pláště (tzv. stopy). Tato stopa má přibližně elipsovité tvar, a od její velikosti se odvíjí velikost odporu valení. K čím větší deformaci pláště dochází, tím se zvětšuje velikost ramena valení e reakce vozovky F_z ve směru pohybu kola a zároveň dochází ke zmenšování dynamického poloměru r_d . Tím pádem se zvětšuje velikost plochy stopy S_{oa} , a podle rovnice $\frac{e}{r_d} = f$ dochází k zvětšování součinitele odporu valení f a zvyšování odporu valení.

Jedním způsobem, jak zjistit velikost plochy stopy S_{oa} , je postavení zatíženého jízdního kola na průhlednou plošku s referenčním obrazcem pro následný výpočet plochy. Díky průhlednosti podložky lze pořídit fotografii stopy a následně pomocí grafického editoru vypočítat její velikost na základě známé velikosti referenční plochy, podobně jako při měření velikosti čelní plochy (viz kapitola 2.2.2). Případně uvažovat stopu jako elipsu a změřit délky poloos a následně vypočítat obsah elipsy.

Praktičtější postup je část pláště obarvit (například razítkovou barvou) a zatížením kola stopu otisknout přímo na podložku, čímž se usnadní fotografování. Použitím stejného postupu jako pro výpočet čelní plochy (pomocí grafického editoru) je poměrně snadné získat velikost plochy stopy S_{oa} .

2.4 Určení velikosti součinitele odporu valení

Součinitel odporu valení je nezbytnou veličinou potřebnou ke zjištění velikosti odporu valení při pohybu vozidla (v mém případě jízdního kola). Pro určení velikosti tohoto součinitele využít zařízení PerformanceBox. Toto zařízení je určeno především pro měření výkonů automobilů. Díky vestavěné GPS anténě PerformanceBox určuje svou polohu, kterou zaznamenává v čase s frekvencí 10 Hz. Díky změny polohy v čase zařízení vypočítává například aktuální rychlost, nebo zrychlení. PerformanceBox je dále schopný měřit ujetou vzdálenost, aktuální nadmořskou výšku, nebo časy ujetých kol na závodním okruhu. Při použití paměťové SD karty, lze všechna naměřená data uložit a následně analyzovat za použití příslušného softwaru (konkrétně PerformanceBoxTools). Nevýhodou tohoto zařízení je fakt, že nevyužívá pro získávání dat akcelerometr, ale GPS signál, a proto musí mít PerformanceBox neustálý přístup k tomuto signálu, což značně omezuje měření v uzavřených prostorech.

Pro mne je nejdůležitější schopností PerformanceBoxu měření zpomalení jedoucího jízdního kola. Jelikož součinitel odporu valení nelze přímo změřit, musím jej dopočítat z rovnice pro velikost odporu valení O_f (1.2.2). Měření zpomalení proběhne za nízkých rychlostí (5 až 10 km/h), kdy cyklista po dosažení počáteční rychlosti pojedou pouze výběhem až do okamžiku zastavení. Toto měření musí proběhnout na rovné a hladké podložce a v bezvětrném prostředí, jelikož neznám součinitele odporu vzduchu c_x , který je potřebný k výpočtu odporu vzduchu O_{vz} . Díky nízkým rychlostem a bezvětrí lze při měření zpomalení zanedbat aerodynamický odpor, a díky rovné podložce není potřeba počítat odpor ze stoupání. Dlouhé chodby budov, případně haly se nabízejí jako ideální místo pro pření, zde ale nastává problém s dostupností GPS signálu. Proto vhodnějším místem, kde lze zanedbat odpory sklonu vozovky jsou přeprady. Další možností je měření opakovat v obou směrech vozovky.

Výsledkem výběhové zkoušky jízdního kola je hodnota zpomalení b v m/s^2 . S předpokladem nulového odporu sklonu vozovky O_s , nulového odporu vzduchu O_{vz} dostáváme tvar pohybové rovnice (1.6.2):

$$F_k = O_f + O_z = G \cdot f + m \cdot a + J_{kol} \cdot \frac{a}{r^2} \cdot 2 [N]$$

Jelikož je hodnota hnací síly na kole F_k je nulová, protože se jedná pouze o výběhovou zkoušku, můžeme říci, že velikost odporu valní O_f odpovídá velikosti odporu ze zrychlení O_z . Záporné znaménko pouze značí působení sil proti sobě.

$$O_f = -O_z [N]$$

Uvědoměním si opačné orientace odporů a rozepsáním a úpravou rovnice můžeme určit velikost odporu valení podle tvaru:

$$G \cdot f = m \cdot b + J_{kol} \cdot \frac{b}{r^2} \cdot 2 [N]$$

Následně jednoduchou úpravou získáváme velikost součinitele odporu valení f :

$$f = \frac{m}{G} \cdot b + \frac{J_{kol} \cdot b}{G \cdot r^2} \cdot 2 [-] \quad (2.4.1)$$

3. Realizace měření a ověření parametrů

3.1 Změření a výpočet polohy těžiště

Polohu těžiště určuji pro dvě různá kola. Konkrétně pro horské mé osobní kolo RockRider B-TWIN 520, s průměrem kola 27,5". A zapůjčené silniční kolo výrobce Favorit, průměrem kola 27". Měření zatížení proběhlo tak, že jsem přední kolo postavil na podložku, která stála na váze. Zadní kolo jsem podložil do stejné roviny. Po nasednutí na kolo jsem z váhy odečetl velikost zatížení. Zatížení na podložce jsem vypočetl jako rozdíl celkové hmotnosti kola s jezdcem a zatížení na předním kole. Po odstranění podložky pod předním kolem jsem z váhy odečetl zatížení na předním kole při naklonění (viz Obr. 9).



Obr. 9 Znázornění měření

3.1.1 Výpočet polohy těžiště horského kola v ose x

Naměřené hodnoty:

$$m_c = 103,5 [kg] \Rightarrow Q = m_c \cdot g = 103,5 \cdot 9,81 = 1015,335 [N] \dots \text{celková zátěž}$$

$$m_1 = 42 [kg] \Rightarrow N_1 = m_1 \cdot g = 42 \cdot 9,81 = 412,02 [N] \dots \text{zatížení předního kola}$$

$$l = 1,145 [m] \dots \text{rozvor kol}$$

Výpočet:

$$N_2 = Q - N_1 = 1015,335 - 412,2 = 603,135 [N] \dots \text{celková zátěž}$$

$$l_1 = \frac{N_2 \cdot l}{Q} = \frac{603,135 \cdot 1,145}{1015,335} = 0,68 [m] \dots \text{vzdálenost těžiště od osy otáčení předního kola}$$

$$l_2 = \frac{N_1 \cdot l}{Q} = \frac{412,02 \cdot 1,145}{1015,335} = 0,465 [m] \dots \text{vzdálenost těžiště od osy otáčení zadního kola}$$

3.1.2 Výpočet polohy těžiště horského kola v ose y

Naměřené hodnoty:

$$m_c = 103,5 \text{ [kg]} \Rightarrow Q = m_c \cdot g = 103,5 \cdot 9,81 = 1015,335 \text{ [N]} \dots \text{celková zátěž}$$

$$m_{1a} = 46,5 \text{ [kg]} \Rightarrow N_{1a} = m_{1a} \cdot g = 46,5 \cdot 9,81 = 456,165 \text{ [N]} \dots \text{zatížení předního kola}$$

$$l = 1,145 \text{ [m]} \dots \text{rozvor kol}$$

$$p = 0,078 \text{ [m]}$$

$$r = 0,345 \text{ [m]}$$

Výpočet:

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{p}{l} = \sin^{-1} \frac{0,078}{1,145} = 3,906^\circ \dots \text{úhel naklopení pro druhé měření}$$

$$s = \frac{N_{1a} - N_1}{Q \cdot \tan \alpha} \cdot l = \frac{456,165 - 412,02}{1015,335 \cdot \tan(3,906)} \cdot 1,145 = 0,729 \text{ [m]} \dots \text{výška těžiště od osy otáčení zadního}$$

kola

$$h = s + r = 0,729 + 0,345 = 1,074 \text{ [m]} \dots \text{výška těžiště od podložky}$$

3.1.3 Výpočet polohy těžiště silničního kola v ose x

Naměřené hodnoty:

$$m_c = 96,38 \text{ [kg]} \Rightarrow Q = m_c \cdot g = 96,38 \cdot 9,81 = 945,49 \text{ [N]} \dots \text{celková zátěž}$$

$$m_1 = 38 \text{ [kg]} \Rightarrow N_1 = m_1 \cdot g = 38 \cdot 9,81 = 372,78 \text{ [N]} \dots \text{zatížení předního kola}$$

$$l = 1,05 \text{ [m]} \dots \text{rozvor kol}$$

Výpočet:

$$N_2 = Q - N_1 = 945,49 - 372,78 = 572,71 \text{ [N]} \dots \text{celková zátěž}$$

$$l_1 = \frac{N_2 \cdot l}{Q} = \frac{572,71 \cdot 1,05}{945,49} = 0,636 \text{ [m]} \dots \text{vzdálenost těžiště od osy otáčení předního kola}$$

$$l_2 = \frac{N_1 \cdot l}{Q} = \frac{372,78 \cdot 1,05}{945,49} = 0,414 \text{ [m]} \dots \text{vzdálenost těžiště od osy otáčení zadního kola}$$

3.1.4 Výpočet polohy těžiště silničního kola v ose y

Naměřené hodnoty:

$$m_c = 96,38 \text{ [kg]} \Rightarrow Q = m_c \cdot g = 96,38 \cdot 9,81 = 945,49 \text{ [N]} \dots \text{celková zátěž}$$

$$m_{1a} = 45 \text{ [kg]} \Rightarrow N_{1a} = m_{1a} \cdot g = 46 \cdot 9,81 = 441,45 \text{ [N]} \dots \text{zatížení předního kola}$$

$$l = 1,05 \text{ [m]} \dots \text{rozvor kol}$$

$$p = 0,102 \text{ [m]}$$

$$r = 0,34 \text{ [m]}$$

Výpočet:

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{p}{l} = \sin^{-1} \frac{0,102}{1,05} = 5,57^\circ \dots \text{úhel naklopení pro druhé měření}$$

$$s = \frac{N_{1a} - N_1}{Q \cdot \tan \alpha} \cdot l = \frac{441,45 - 372,78}{945,49 \cdot \tan(5,57)} \cdot 1,05 = 0,782 \text{ [m]} \dots \text{výška těžiště od osy otáčení zadního kola}$$

$$h = s + r = 0,782 + 0,34 = 1,122 \text{ [m]} \dots \text{výška těžiště od podložky}$$

3.2 Výpočet čelní plochy jezdce na kole

Pro přesnost určení této veličiny jsem nejprve musel vypočítat těžiště jezdce sedícího na stojícím kole, abych mohl umístit referenční plochu se známým obsahem do roviny těžiště. Jízdní kolo jsem postavil na rovnou podložku a pedálem jsem jej opřel o podpěru. Na umístěné kolo jsem nasedl a pořídil fotografii (Obr. 10). Fotoaparát byl umístěn v ose kola a ve výšce těžiště, aby se zamezilo deformaci obrazu, z důvodu příliš velkého úhlu focení.



Obr. 10 Čelní plocha

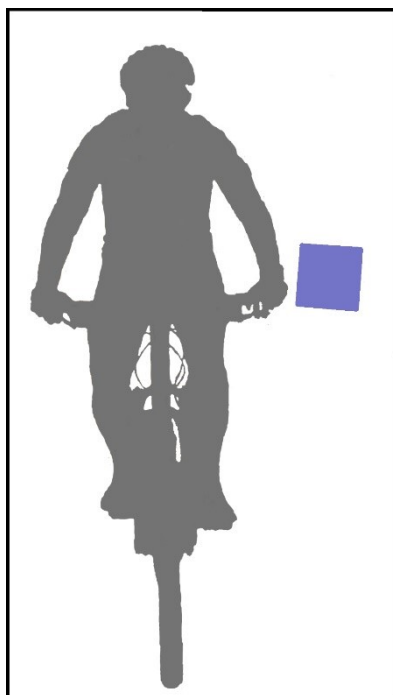
3.2.1 Výpočet čelní plochy jezdce na horském kole

V grafickém editoru GIMP 2.8 jsem obtáhl kolo a jezdce šedou barvou, a referenční čtverec, o hraně 0,2 metrů, modře. Obtažené tvary jsem následně vybarvil (Obr. 11). Zbytek fotografie jsem vybarvil bíle a ohraničil černým rámečkem (Obr. 12).



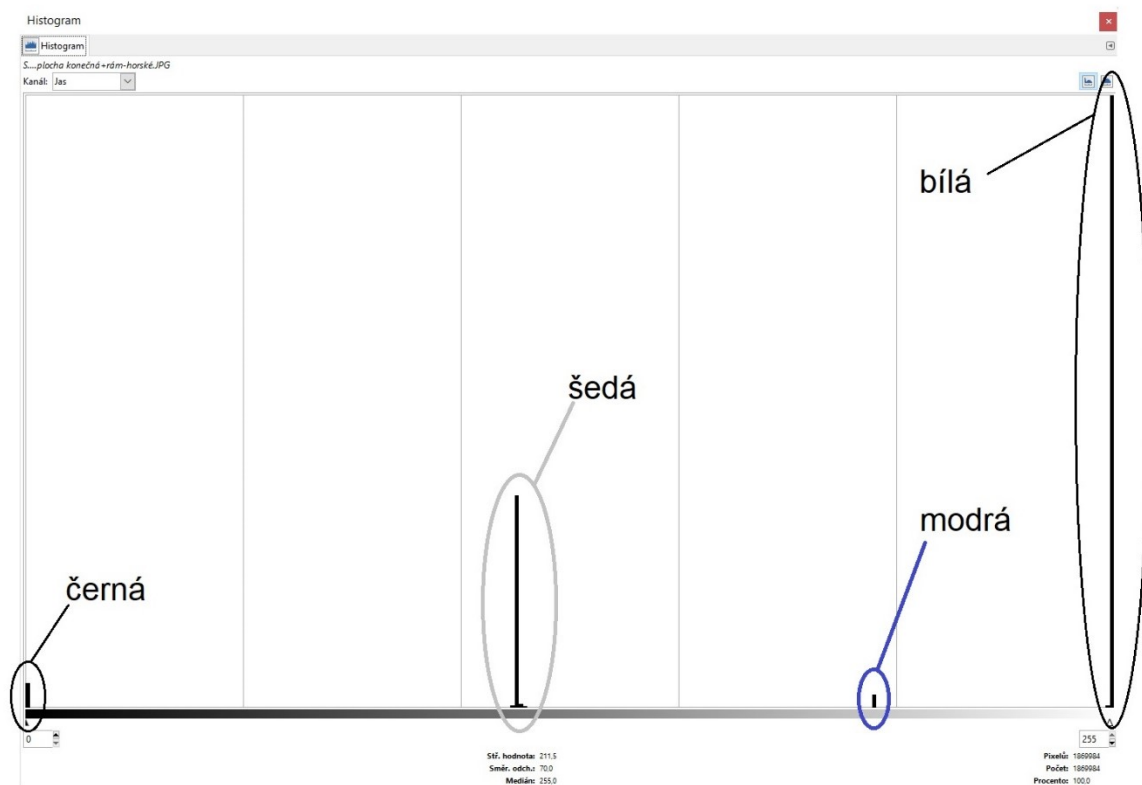
Obr. 11 Obrys čelní plochy – horské kolo

Zbytek fotografie jsem vybarvil bíle a ohraničil černým rámečkem (Obr. 12).



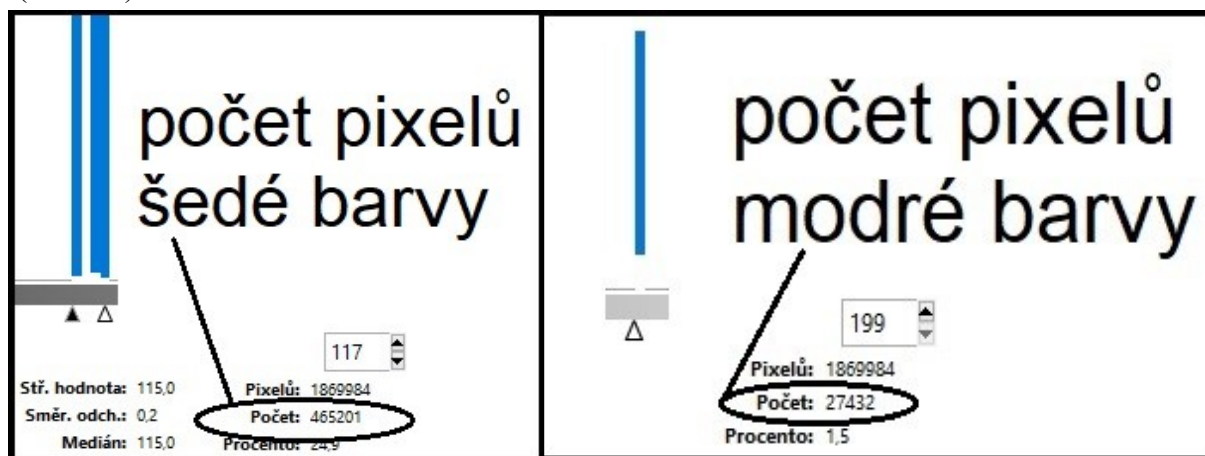
Obr. 12 Čelní plocha – horské kolo

Následně jsem v grafickém editoru využil funkce Histogram (Obr. 13), která ukazuje zastoupení jednotlivých barev počtu pixelů v obrázku.



Obr. 13 Histogram – horské kolo

V pravém spodním rohu histogramu je vyznačen počet pixelů celého obrázku. Označením potřebné oblasti barev dostanu hledanou hodnotu počtu pixelů dané barvy (Obr. 14).



Obr. 14 Počet pixelů – horské kolo

Jelikož vím, že plocha tvořená modrými pixely je čtverec o velikosti hrany a můžu vypočítat jeho obsah a následně pomocí vzorce (3.2.1) dopočítat velikost čelní plochy $S_{\text{šedá}}$, která odpovídá velikosti čelní plochy horského kola s jezdcem $S_{\text{horské kolo}}$.

Výpočet:

$c = 0,2 \text{ [m]}$...délka hrany referenční plochy

$n_{\text{modrá}} = 27432 \text{ [-]}$...počet pixelů modré barvy

$n_{\text{šedá}} = 465201 \text{ [-]}$...počet pixelů šedé barvy

$S_{\text{modrá}} = a \cdot a = 0,2 \cdot 0,2 = 0,04 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah modré plochy

$S_{\text{šedá}} = \frac{S_{\text{modrá}}}{n_{\text{modrá}}} \cdot n_{\text{šedá}} = \frac{0,04}{27432} \cdot 465201 = 0,678 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah šedé plochy

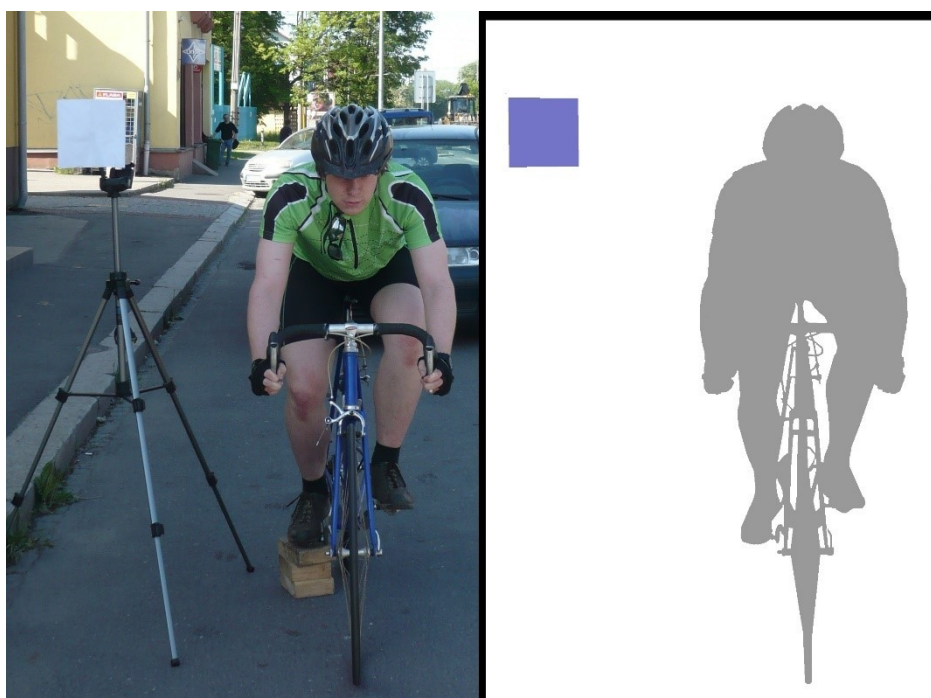
(3.2.1)

$S_{\text{šedá}} = S_{\text{horské kolo}} = 0,678 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah čelní plochy horského kola s jezdcem

3.2.2 Výpočet čelní plochy jezdce na silničním kole

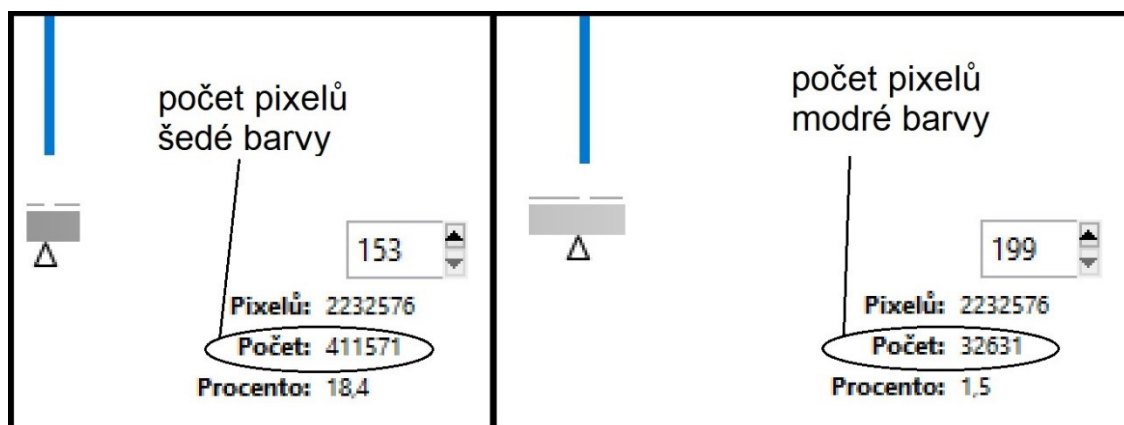
Pro výpočet čelní plochy jsem opět použil grafický editor GIMP 2.8 a postupoval jsem naprosto stejně jako při výpočtu čelní plochy jezdce na kole horském. Pořídil jsem fotografii jezdce sedícího na kole s referenční plochou o straně $c = 0,2 \text{ m}$. Opět jsem čelní plochu obtáhl šedou barvou, referenční čtverec barvou modrou a následně tvary vybarvil.

Zbytek fotografie jsem vybarvil bílou barvou a pro lepší kontrast jsem kolem obrázku udělal černý rámeček.



Obr. 15 Čelní plocha – silniční kolo

Použitím funkce Histogram jsem dostal počty pixelů jednotlivých barev na obrázku. Opět potřebuji pouze hodnoty šedých a modrých pixelů (Obr 16).



Obr. 16 Počet pixelů – silniční kolo

Díky tomu, že znám skutečný obsah referenční plochy (modrá), můžu stejným postupem, jako pro určování čelní plochy horského kola, dopočítat skutečný obsah čelní plochy jezdce na kole (šedá).

Výpočet:

$c = 0,2 \text{ [m]}$...délka hrany referenční plochy

$n_{modrá} = 32631 \text{ [-]}$...počet pixelů modré barvy

$n_{šedá} = 411571 \text{ [-]}$...počet pixelů šedé barvy

$S_{modrá} = a \cdot a = 0,2 \cdot 0,2 = 0,04 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah modré plochy

$S_{šedá} = \frac{S_{modrá}}{n_{modrá}} \cdot n_{šedá} = \frac{0,04}{32631} \cdot 411571 = 0,505 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah šedé plochy

$S_{šedá} = S_{silniční kolo} = 0,505 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah čelní plochy silničního kola s jezdce

3.3 Výpočet plochy stopy

Při zjišťování plochy stopy jsem postupoval následně. Plášť kola jsem na větší části očistil od nečistot, které by ovlivnily obraz stopy. Následně jsem na očištěnou část nanesl malé množství razítkovacího inkoustu. Kolo jsem otočil obarvenou stranou dolů, zabrzdil a postavil na papír ležící na zemi. Potom jsem na zabrzděné kolo nasedl. Díky razítkovacímu inkoustu se na papír obtiskla stopa zatíženého kola. Vedle obtisknuté stopy kola jsme narýsoval čtverec o hraně $c = 0,01 \text{ m}$. Následně jsem pořídil fotografii stopy s narýsovaným čtvercem.

S fotografií jsem postupoval obdobně jako při zjišťování obsahu čelní plochy jezdce sedícího na kole. Fotografie jsem otevřel v grafickém editoru GIMP, obtáhl obrys stopy šedou barvou a vybarvil, narýsovaný čtverec modrou barvou a zbytek obrázku bíle. Pomocí funkce Histogram jsem určil počet pixelů jednotlivých barev. Ze známého obsahu modrého čtverce a počtu modrých pixelů a šedých pixelů jsem dopočetl obsah stopy.

3.3.1 Výpočet plochy stop horského kola

Velikost stopy je nutné spočítat pro přední i zadní kolo. Celkový obsah obou stop lze následně porovnat s koeficientem odporu valení f . Pro horské kolo odpovídají obrázky 17 (přední kolo) a 18 (zadní kolo). Měření proběhlo pro tlaky v pneumatikách p_1 pro přední kolo a p_2 pro zadní.

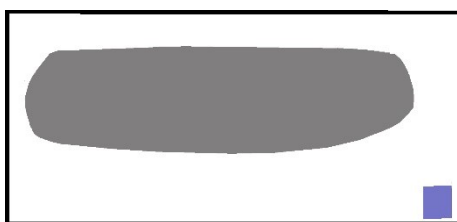


Obr. 17 Horské kolo – obtisk předního kola

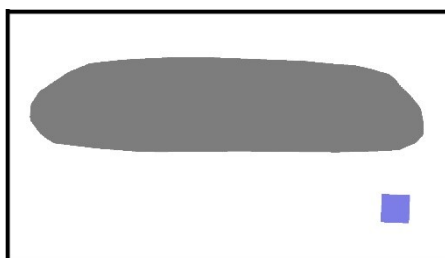


Obr. 18 Horské kolo – obtisk zadního kola

Obtažením a vybarvením stop a referenčních čtverců jsem dostal obrázky 19 (přední kolo) a 20 (zadní kolo).

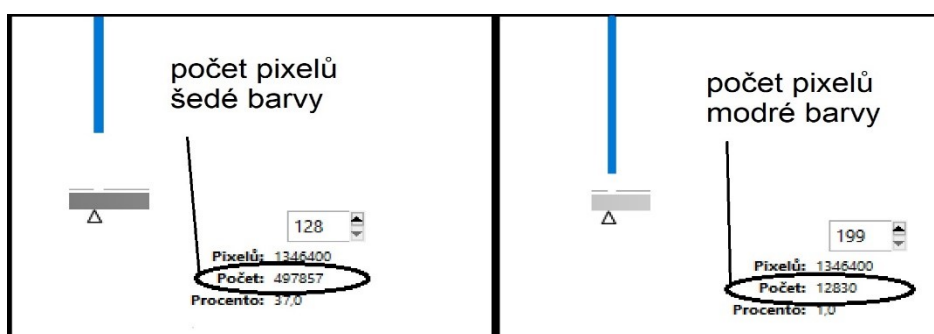


Obr. 19 Horské kolo – přední kolo

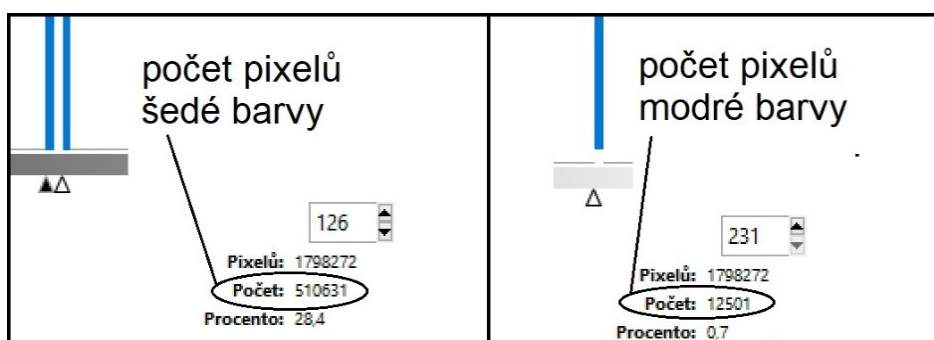


Obr. 20 Horské kolo – zadní kolo

Pomocí funkce Histogram jsem dostal hodnoty pixelů jednotlivých barev (Obr. 21, Obr 22).



Obr. 21 Horské kolo – přední (pixely)



Obr. 22 Horské kolo – zadní (pixely)

Přední kolo:

$p_1 = 172\,252 \text{ [Pa]}$...tlak v zatížené přední pneumatice

$c = 0,01 \text{ [m]}$...délka hrany referenční plochy

$n_{modrá} = 12830 \text{ [-]}$...počet pixelů modré barvy

$n_{šedá} = 497857 \text{ [-]}$...počet pixelů šedé barvy

$S_{modrá} = b \cdot b = 0,01 \cdot 0,01 = 0,0001 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah modré plochy

$S_{šedá} = \frac{S_{modrá}}{n_{modrá}} \cdot n_{šedá} = \frac{0,0001}{12830} \cdot 497857 = 0,00388 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah šedé plochy

$S_{šedá} = S_{předí (horské)} = 0,00388 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah stopy předního kola

Zadní kolo:

$p_2 = 141\,855 \text{ [Pa]}$...tlak v zatížené zadní pneumatice

$c = 0,01 \text{ [m]}$...délka hrany referenční plochy

$n_{modrá} = 12501 \text{ [-]}$...počet pixelů modré barvy

$n_{šedá} = 510631 \text{ [-]}$...počet pixelů šedé barvy

$S_{modrá} = b \cdot b = 0,01 \cdot 0,01 = 0,0001 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah modré plochy

$$S_{\text{šedá}} = \frac{S_{\text{modrá}}}{n_{\text{modrá}}} \cdot n_{\text{šedá}} = \frac{0,0001}{12501} \cdot 510631 = 0,00488 \text{ [m}^2\text{]} \dots \text{obsah šedé plochy}$$

$$S_{\text{šedá}} = S_{\text{zadní (horské)}} = 0,00488 \text{ [m}^2\text{]} \dots \text{obsah stopy předního kola}$$

Celková plocha stop horského kola:

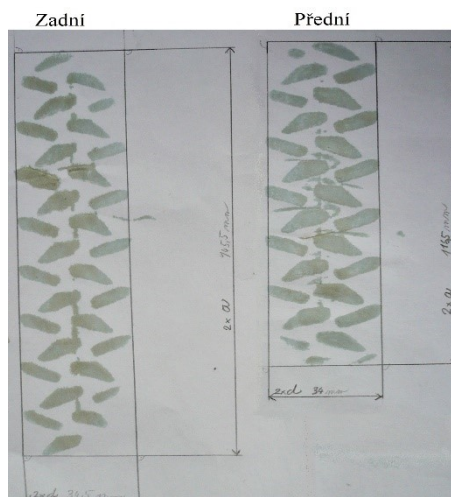
$$S_{c, \text{horské}} = S_{\text{zadní (horské)}} + S_{\text{předí (horské)}} = 0,00488 + 0,00388 = 0,00876 \text{ [m}^2\text{]}$$

3.3.2 Stopa horského kola jako elipsa

V předchozí podkapitole jsem se zabýval stoupou jakožto tvarem, který skutečně vzorek pláště obtisknul na podložku. V praxi se však používá tvar elipsy, jelikož jakožto geometrický útvar má dané vztahy a zákonitosti. U horského kola je navíc obtisk velmi ovlivněn okrajovými částmi vzorku pláště, které se sice obtisknou, ale ve skutečnosti na ně působí minimální zatížení.

Z obtisknutých stop jsem zjistil délku hlavní poloosy x , a vedlejší poloosy y (Obr. 23). Se znalostí velikostí poloos jsem mohl vypočítat obsah elipsy (vzorec 3.3.2).

$$S_{eH} = \pi \cdot x \cdot y \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.3.2)$$



Obr. 23 Rozměry stop – horské kolo

Přední kolo:

$$S_{eH} = \pi \cdot 0,05825 \cdot 0,017 = 0,00311 \text{ [m}^2\text{]}$$

$x = 0,05825 \text{ [m]}$... délka hlavní poloosy

$y = 0,017 \text{ [m]}$... délka vedlejší poloosy

$S_{eH} = 0,00311 \text{ [m}^2\text{]}$... obsah elipsovité stopy

Zadní kolo:

$$S_{eH} = \pi \cdot 0,07275 \cdot 0,01725 = 0,00394 \text{ [m}^2\text{]}$$

$x = 0,07275 \text{ [m]}$...délka hlavní poloosy

$y = 0,01725 \text{ [m]}$... délka vedlejší poloosy

$S_{eH} = 0,00394 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah elipsovité stopy

Celková velikost stop horského kola je rovna součtu obsahu zadního a předního kola.

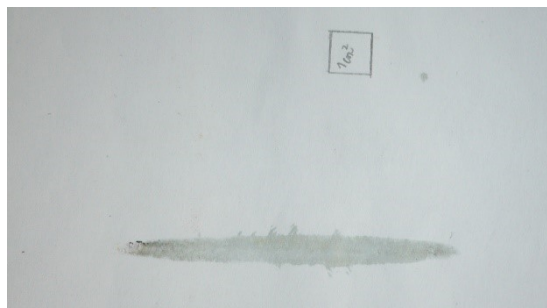
$$S_{eHcelkové} = 0,00394 + 0,00311 = 0,00705 \text{ [m}^2\text{]}$$

3.3.3 Výpočet plochy stop silničního kola

Pro silniční kolo platí totožný postup, jako při měření kola horského. Avšak obtisk stopy předního kola vypadá téměř bez vzorku, protože vzorek na plášti předního kola byl velmi jemný (Obr.23). Měření proběhlo pro tlaky v pneumatikách p_1 pro přední kolo a p_2 pro zadní.



Obr. 24 Vzorek silničního kola (přerdní)

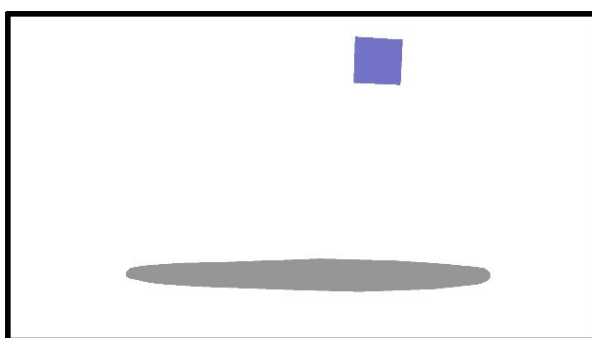


Obr. 25 Silniční kolo – obtisk předního kola

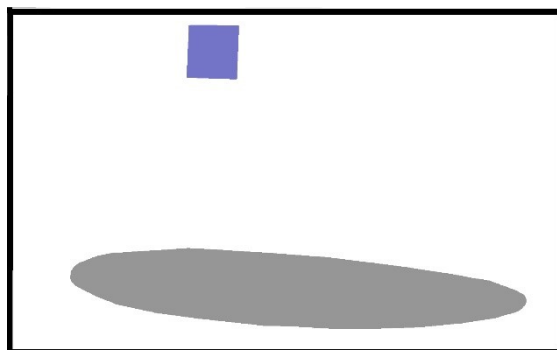


Obr. 26 Silniční kolo – obtisk zadního kola

Stejně jako u kola horského obtažením a vybarvením stop jsem dostal obrázky s dvěma různobarevnými obrazci.

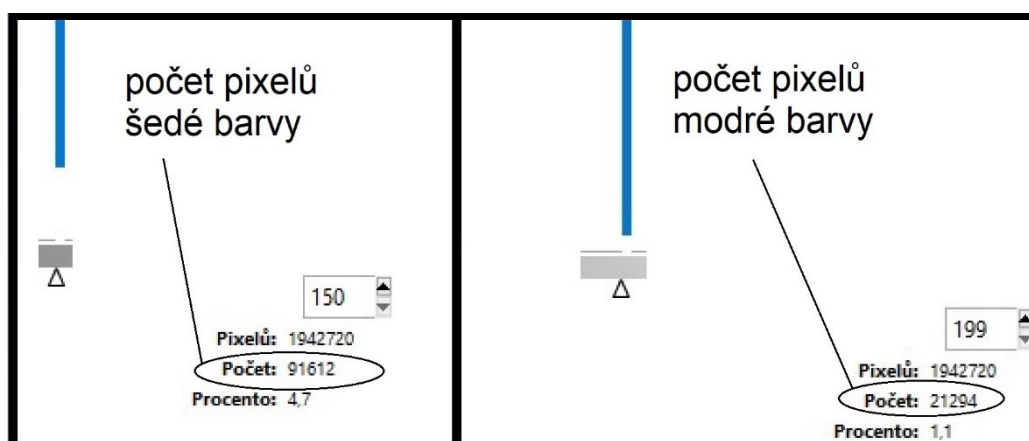


Obr. 27 Silniční kolo – přední kolo

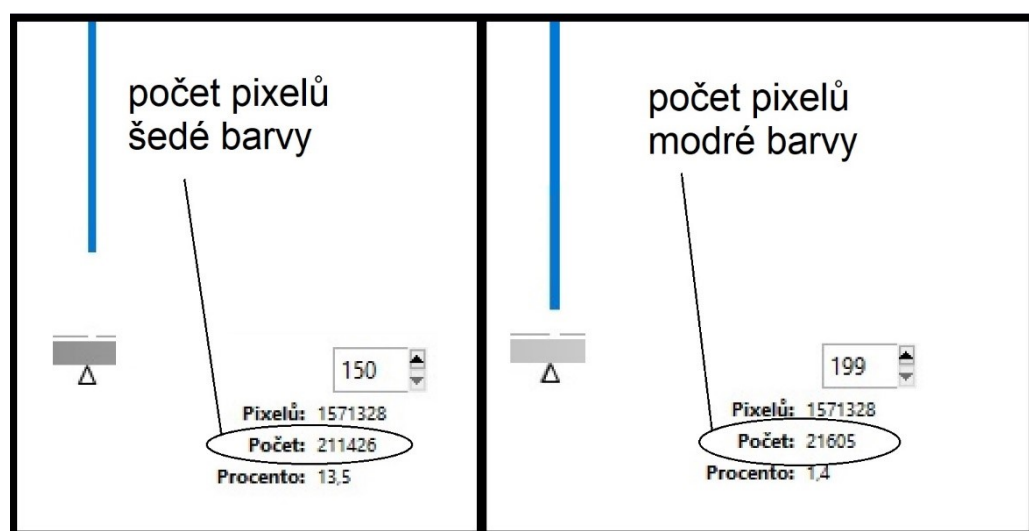


Obr. 28 Silniční kolo – zadní kolo

Z funkce Histogram jsem dostal hodnoty počtu pixelů daných barev (viz Obr. 28 a 29).



Obr. 29 Silniční kolo – přední (pixely)



Obr. 30 Silniční kolo – zadní (pixely)

Přední kolo:

$p_1 = 873\,565 \text{ [Pa]}$...tlak v zatížené přední pneumatice

$c = 0,01 \text{ [m]}$...délka hrany referenční plochy

$n_{\text{modrá}} = 21294 \text{ [-]}$...počet pixelů modré barvy

$n_{\text{šedá}} = 91612 \text{ [-]}$...počet pixelů šedé barvy

$S_{\text{modrá}} = b \cdot b = 0,01 \cdot 0,01 = 0,0001 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah modré plochy

$S_{\text{šedá}} = \frac{S_{\text{modrá}}}{n_{\text{modrá}}} \cdot n_{\text{šedá}} = \frac{0,0001}{21294} \cdot 91612 = 0,00043 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah šedé plochy

$S_{\text{šedá}} = S_{\text{předí (silniční)}} = 0,00043 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah stopy předního kola

Zadní kolo:

$p_2 = 682\,580 \text{ [Pa]}$...tlak v zatížené zadní pneumatice

$c = 0,01 \text{ [m]}$...délka hrany referenční plochy

$n_{modrá} = 21605 \text{ [-]}$...počet pixelů modré barvy

$n_{šedá} = 211426 \text{ [-]}$...počet pixelů šedé barvy

$S_{modrá} = b \cdot b = 0,01 \cdot 0,01 = 0,0001 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah modré plochy

$S_{šedá} = \frac{S_{modrá}}{n_{modrá}} \cdot n_{šedá} = \frac{0,0001}{21605} \cdot 211426 = 0,000979 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah šedé plochy

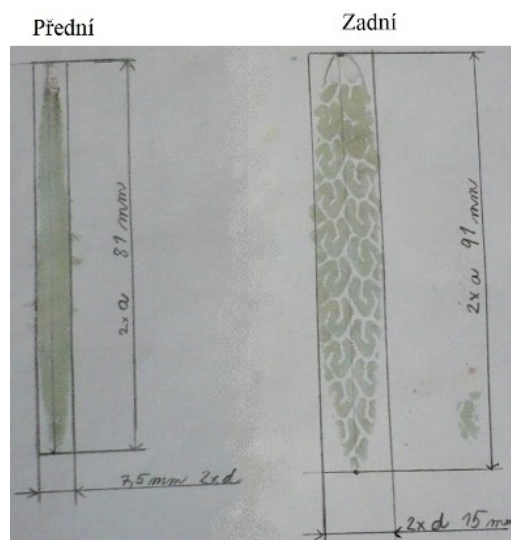
$S_{šedá} = S_{zadní (silniční)} = 0,000979 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah stopy předního kola

Celková plocha stop silničního kola:

$$S_{c, \text{silniční}} = S_{zadní (silniční)} + S_{předí (silniční)} = 0,00043 + 0,000979 = 0,00141 \text{ [m}^2\text{]}$$

3.3.4 Stopa silničního kola jako elipsa

Obdobně, jako u horského kola se tvar stopy uvádí jako elipsa. Ale na rozdíl od horského kola je tvar skutečného obtisku pláště velmi blízko elipsy (Obr 31). Opět jsem z obtisku stopy získal hodnoty poloos x , a y a vypočetl hodnotu obsahu.



Obr. 31 Rozměry stop – silniční kolo

Přední kolo:

$$S_{eS} = \pi \cdot 0,0405 \cdot 0,00375 = 0,000477 \text{ [m}^2\text{]}$$

$x = 0,0405 \text{ [m]}$... délka hlavní poloosy

$y = 0,00375 \text{ [m]}$... délka vedlejší poloosy

$S_{eH} = 0,000477 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah elipsovité stopy

Zadní kolo:

$$S_{eH} = \pi \cdot 0,0455 \cdot 0,0075 = 0,00107 \text{ [m}^2\text{]}$$

$x = 0,0455 \text{ [m]}$...délka hlavní poloosy

$y = 0,0075 \text{ [m]}$... délka vedlejší poloosy

$S_{eH} = 0,00107 \text{ [m}^2\text{]}$...obsah elipsovité stopy

Celková velikost stop horského kola je rovna součtu obsahu zadního a předního kola.

$$S_{eScelkové} = 0,000477 + 0,00107 = 0,001547 \text{ [m}^2\text{]}$$

3.4 Měření a výpočet součinitele odporu valení

Výchozím parametrem pro výpočet součinitele odporu valení f v mém případě byla hodnota zpomalení b . Hodnotu zpomalení jsem získal z výběhové zkoušky kola pomocí přístroje Racelogic PerformanceBox. Přístroj je konstruován pro měření parametrů jízdy automobilů, z čehož vyplývá i způsob napájení pomocí autozásuvky (napětí 12 V). Pro mé měření se nejlépe hodí lehký a kompaktní zdroj energie, proto jsem použil redukci z autozásuvky na konektor USB (male), díky kterému jsem mohl PerformanceBox napájet z tzv. power banky (napětí 5V).

I když výstupní napětí autozásuvky je 12V, PerformanceBox byl schopný bez problému pracovat i na napětí pouhých 5V dodávaných power bankou.



Obr. 32 Konektor autozásuvky a USB redukce

Při samotném měření jsem PerformanceBox připevnil na řídítka kola pomocí igelitové fólie a lepicí pásky tak, abych viděl na displej ukazující aktuální rychlost (viz Obr. 31)



Obr. 33 Upevnění PerformanceBox

Anténu GPS jsem připevnil na rám kola, abych zabránil nežádoucímu pohybu, ke kterému by došlo, kdyby byla připevňená na řídítkách, nebo na jezdcí. Power banku jsem na horském kole umístil do brašny pod rámem kola, u silničního kola jsem power banku přilepil k rámu samotnému.

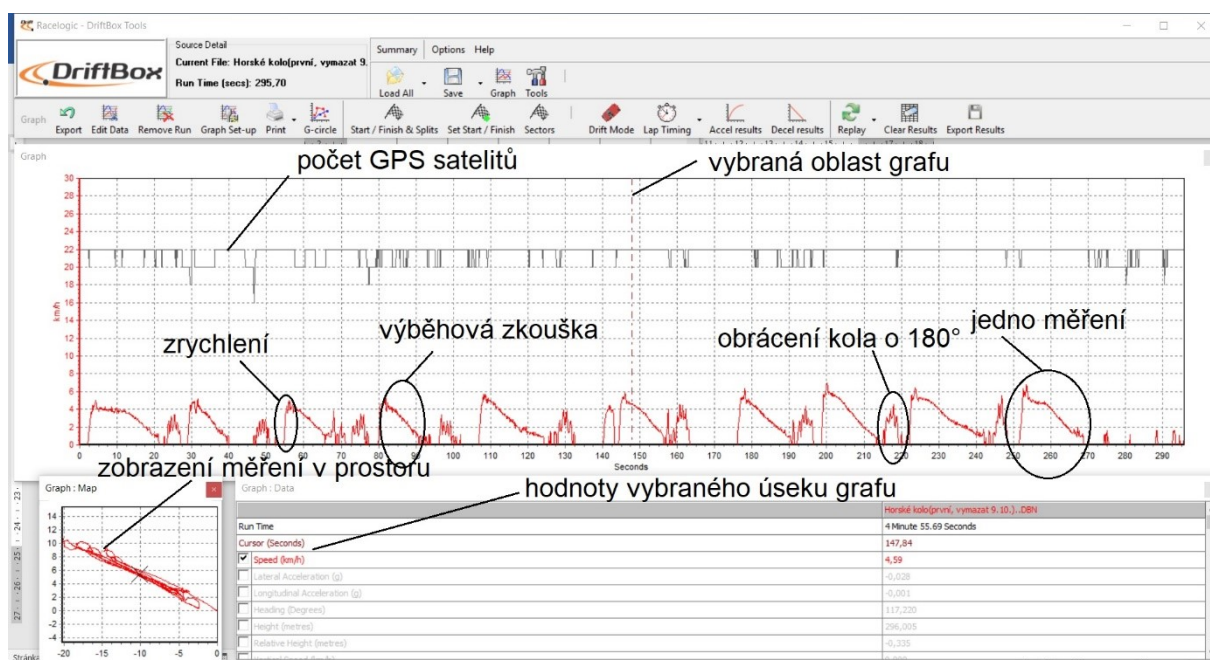


Obr. 34 Upevnění GPS a power banky

Samotné měření proběhlo na rovném úseku cyklostezky v Ostravě – Kunčicích. Výběh byl proveden z přibližné rychlosti 5 km/h. Pro zvýšení přesnosti jsme měření provedli několikrát v obou směrech, tím jsem redukoval vliv sklonu vozovky a odporu vzduchu.

3.4.1 Valivý součinitel horského kola

Pro analýzu naměřených dat jsem využil program DriftBox Tools. Pomocí funkce Decel results jsem dostal hodnoty času trvání jednotlivých výběhů a ujeté vzdálenosti.



Obr. 35 DriftBox Tools – horské kolo

Z funkce Decel results jsem dostal tabulku hodnot (Obr. 36), ze které jsem vyřadil 9. a 10. měření, jelikož se příliš liší od ostatních. Pravděpodobně jsme při měření ztratil rovnováhu dříve, než výběhová zkouška skončila.

| use | Run num | Time(s) | Dist(m) | Graph run |
|-------------------------------------|---------|---------|----------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | 1 | 7,88 | 5,62 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 2 | 9,53 | 7,75 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 3 | 8,81 | 6,97 | |
| <input type="checkbox"/> | 4 | 13,00 | 8,06 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 5 | 10,14 | 9,08 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 6 | 5,36 | 2,39 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 7 | 7,56 | 4,94 | |
| <input type="checkbox"/> | 8 | 8,98 | 4,51 | |
| <input type="checkbox"/> | 9 | 1,40 | 0,98 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 10 | 3,62 | 1,23 | |
| | | | Avg=5,43 | |

Obr. 36 Decel results – horské kolo

Výpočet zpomalení:

Ze znalosti ujeté dráhy s_z za čas t , lze vypočítat velikost zpomalení b (vzorec 3.4.1).

$$b = \frac{2 \cdot s}{t^2} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (3.4.1)$$

Tab. 1 Zpomalení – horské kolo

| Měření | Čas t [s] | Dráha s_z [m] | Zpomalení b [m/s ²] |
|--------|-------------|-----------------|-----------------------------------|
| 1. | 7,88 | 5,62 | 0,181 |
| 2. | 9,53 | 7,75 | 0,171 |
| 3. | 8,81 | 6,97 | 0,179 |
| 4. | 10,14 | 9,08 | 0,177 |
| 5. | 5,36 | 2,39 | 0,166 |
| 6. | 7,56 | 4,94 | 0,173 |
| 7. | 3,62 | 1,23 | 0,188 |

Pro další postup je potřeba vypočítat moment setrvačnosti horského kola $J_{horské}$. Tento moment jsem určil tzv. metodou malých kyvů. Kolo o hmotnosti m jsem zavěsil na rameni u , a nechal jsem jej provést jeden kmit (dva kyvy). Měřením jsem dostal čas trvání jednoho kmitu T (perioda kmitů). Měření jsem provedl několikrát a z výsledných hodnot jsem vypočítal průměrnou hodnotu periody kmitů. Pomocí vzorce 3.4.2 jsem vypočítal velikost momentu setrvačnosti $J_{horské}$. [12]

$$J_{horské} = T^2 \cdot \frac{m_{kola} \cdot g \cdot u}{4 \cdot \pi^2} - m \cdot u^2 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]} \quad (3.4.2)$$

$$J_{horské} = 2,48^2 \cdot \frac{2,54 \cdot 9,81 \cdot 1,49}{4 \cdot \pi^2} - 2,54 \cdot 1,49 = 0,141 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$$

$$u = 1,49 \text{ [m]}$$

$$T = 2,48 \text{ [s]}$$

$$m_{kola} = 2,54 \text{ [kg]}$$

Výpočet součinitele valivého odporu:

Dosazením známých hodnot zpomalení b , momentu setrvačnosti kola $J_{horské}$, poloměru kola r_z , hmotnosti kola s jezdce m a tíhového zrychlení g , do rovnice pro výpočet velikosti součinitele odporu valení f (vzorec 2.4.1) dostávám velikost odporu valení horského kola f_h .

$$f = \frac{m}{G} \cdot b + \frac{J_{kol} \cdot b}{G \cdot r^2} \cdot 2 = \frac{m}{m \cdot g} \cdot b + \frac{J_{horské} \cdot b}{m \cdot g \cdot r^2} \cdot 2 [-]$$

$$J_{horské} = 0,141 [kg \cdot m^2]$$

$$r = 0,345 [m]$$

$$m = 103,5 [kg]$$

$$g = 9,81 [m/s^2]$$

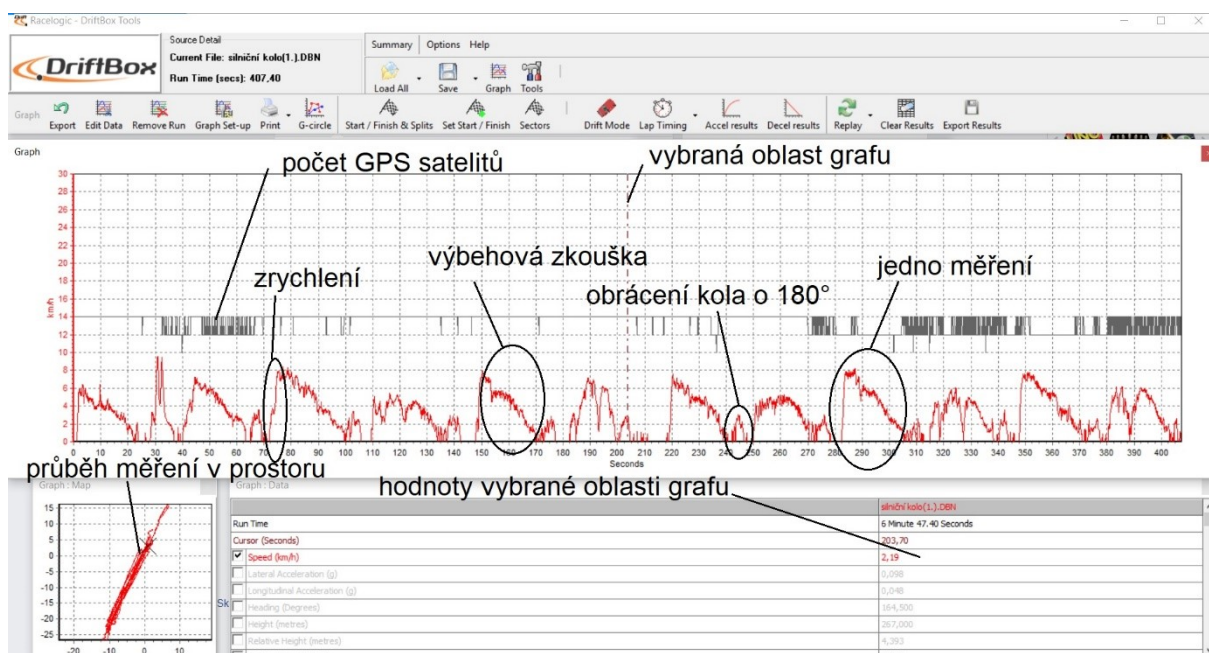
Tab. 2 Součinitel odporu valení – horské kolo

| Měření | Zpomalení $b [m/s^2]$ | Součinitel odporu valení $f_h [-]$ |
|--------|--------------------------|---------------------------------------|
| 1. | 0,181 | 0,0189 |
| 2. | 0,171 | 0,0178 |
| 3. | 0,179 | 0,0187 |
| 4. | 0,177 | 0,0185 |
| 5. | 0,166 | 0,0173 |
| 6. | 0,173 | 0,0180 |
| 7. | 0,188 | 0,0196 |
| Průměr | 0,176 | 0,0184 |

Výsledná hodnota součinitele odporu valení horského kola odpovídá hodnotě 0,018 [-].

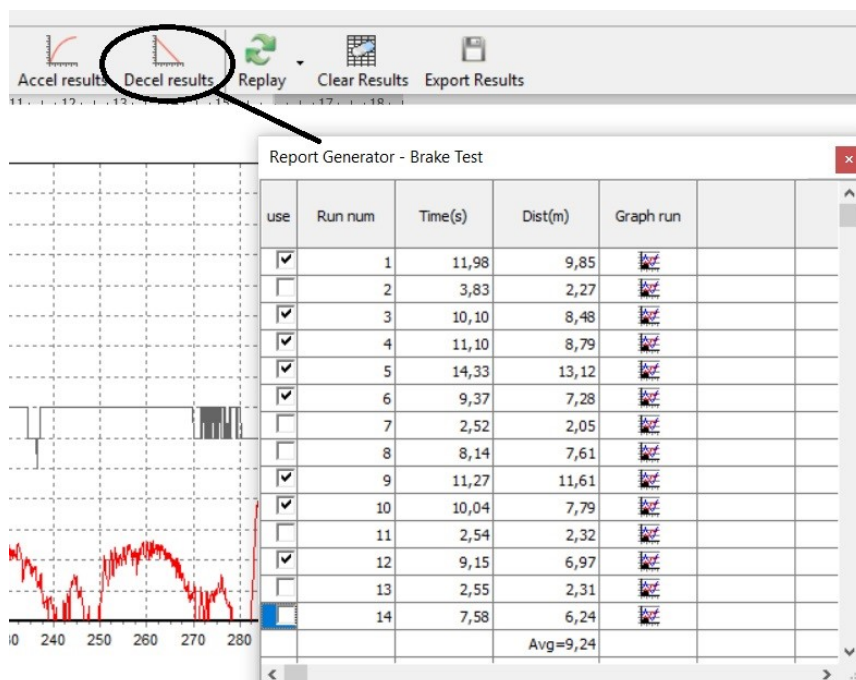
3.4.2 Valivý součinitel silničního kola

Měření zpomalení výběhovou zkouškou jsem provedl na stejném úseku cyklostezky v Ostravě – Kunčicích. Výsledek měření je zobrazen na obrázku 37.



Obr. 37 DriftBox Tools – silniční kolo

Z funkce Decel results jsem dostal tabulku hodnot (Obr. 34), ze které jsem vyřadil 9. a 10. měření, jelikož se příliš liší od ostatních. Pravděpodobně jsme při měření ztratili rovnováhu dříve, než výběhová zkouška skončila.



Obr. 38 Decel results – silniční kolo

Výpočet zpomalení:

Dosazením do rovnice pro výpočet zpomalení (rovnice 3.4.1) dostávám hodnoty zpomalení pro jednotlivá měření.

Tab. 3 Zpomalení – silniční kolo

| Měření | Čas t [s] | Dráha s_z [m] | Zpomalení b [m/s ²] |
|--------|-------------|-----------------|-----------------------------------|
| 1. | 11,98 | 9,85 | 0,137 |
| 2. | 10,10 | 8,48 | 0,166 |
| 3. | 11,10 | 8,79 | 0,143 |
| 4. | 14,33 | 13,12 | 0,128 |
| 5. | 9,37 | 7,28 | 0,165 |
| 6. | 11,27 | 11,61 | 0,182 |
| 7. | 10,04 | 7,79 | 0,154 |
| 8. | 9,15 | 6,97 | 0,166 |

Opět jsem potřeboval pro další postup velikost momentů setrvačnosti kol. Postupoval jsem naprosto stejně jako u horkého. Výsledná hodnota $J_{\text{silniční}}$ je 0,0282 kg·m².

Výpočet součinitele valivého odporu:

Použitím vzore pro výpočet součinitele valivého odporu (2.4.1) dostávám hodnoty jednotlivých měření, které jsem zprůměroval ve výslednou hodnotu.

$$f = \frac{m}{G} \cdot b + \frac{J_{\text{kol}} \cdot b}{G \cdot r^2} \cdot 2 = \frac{m}{m \cdot g} \cdot b + \frac{J_{\text{silniční}} \cdot b}{m \cdot g \cdot r^2} \cdot 2 [-]$$

$$J_{\text{silniční}} = 0,0282 [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad 0,0282$$

$$r = 0,3425 [\text{m}]$$

$$m = 96,38 [\text{kg}]$$

$$g = 9,81 [\text{m/s}^2]$$

Tab. 4 Součinitel odporu valení – silniční kolo

| Měření | Zpomalení b [m/s ²] | Součinitel odporu valení f_s [-] |
|--------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. | 0,137 | 0,0139 |
| 2. | 0,166 | 0,0169 |
| 3. | 0,143 | 0,0145 |
| 4. | 0,128 | 0,0130 |
| 5. | 0,165 | 0,0168 |
| 6. | 0,182 | 0,0185 |
| 7. | 0,154 | 0,0157 |
| 8. | 0,166 | 0,0169 |
| Průměr | 0,155 | 0,0157 |

Výsledná hodnota součinitele odporu valení horského kola odpovídá hodnotě 0,0157 [-].

4. Výpočtové využití vybraných parametrů

Naměřené parametry slouží k výpočtu velikosti hnací síly, kterou je nutné přivést na zadní kolo pro překonání odporů působících proti pohybu jedoucího jízdního kola. Avšak pro úplnost pohybové rovnice, konkrétně úplnost odporu vzduchu O_{vz} . Podstatným parametrem ovlivňujícím velikost odporu vzduchu je tvarový součinitel odporu vzduchu c_x . Tento součinitel vychází z aerodynamických vlastností jedoucího cyklisty na kole, které se obtížně určují, a proto jej ve své bakalářské práci neřeším. Pro výpočty volím hodnotu c_x 1,15 [13] pro silniční kolo a pro horské kolo hodnotu 1,25. Všechny příklady jsou řešeny pro jízdu trvající jednu hodinu ($t = 1$ [h]) na odpovídající vzdálenosti l .

Výpočty vychází z pohybové rovnice:

$F_{kolo} = O_s + O_f + O_{vz} + O_z$ [N]... Síla přivedená na kolo

$$F_{kolo} = G \cdot \sin \alpha + G \cdot f \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot c_x \cdot v^2 + m \cdot a + J_{kol} \cdot i^2 \frac{a}{r^2} + J_{kol} \cdot \frac{a}{r^2} \text{ [N]}$$

$F_{kazeta} = \frac{F_{kolo} \cdot r}{r_{kazeta}}$ [N]... Síla nutná na kazetě zadního kola

$F_p = F_{kazeta} \cdot i \cdot \frac{1}{\eta}$ [N]... Síla přivedená na ozubené kolo převodníku

$F = \frac{F_p \cdot r_{př}}{R}$ [N]... Síla působící na pedál

$P = \frac{F \cdot l_s}{t}$ [W]... Výkon cyklisty

Horské kolo:

$m_c = 103,5$ [kg]... celková hmotnost jezdce s kolem

$r_h = 0,345$ [m]... poloměr kola

$f_h = 0,0184$ [-]... součinitel valivého odporu

$\rho = 1,293$ [kg/m³]... hustota vzduchu

$c_x = 1,25$ [-]... tvarový součinitel odporu vzduchu

$S_h = 0,678$ [m²]... čelní plocha

$\eta = 0,98$ [-]... účinnost řetězového převodu

$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{11}{42} = 0,262$ [-]... převodový poměr

$R = 0,175$ [m]... délka kliky pedálu

$r_{př} = 0,08$ [m]... poloměr převodníku v záběru

$r_{kazety} = 0,021 [m]$...poloměr ozubeného kola kazety (z_2)

Silniční kolo:

$m_c = 96,38[kg]$...celková hmotnost jezdce s kolem

$r_s = 0,34 [m]$... poloměr kola

$f_s = 0,0157 [-]$...součinitel valivého odporu

$\rho = 1,293 [kg/m^3]$...hustota vzduchu

$c_x = 1,15 [-]$...tvarový součinitel odporu vzduchu

$S_s = 0,505 [m^2]$...čelní plocha

$\eta = 0,98 [-]$...účinnost řetězového převodu

$i = \frac{z_2}{z_1} = \frac{11}{50} = 0,22 [-]$...převodový poměr

$R = 0,175 [m]$...délka kliky pedálu

$r_{př} = 0,095 [m]$...poloměr převodníku v záběru

$r_{kazety} = 0,021 [m]$...poloměr ozubeného kola kazety (z_2)

4.1 Jízda po rovině konstantní rychlostí 30 km/h

$v = 30 [km/h] = 8,33 [m/s]$...rychlost jízdy

Horské kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 103,5 \cdot 9,81 \cdot 0,0184 + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,678 \cdot 1,25 \cdot 8,33^2 = 56,7 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{56,7 \cdot 0,345}{0,021} = 931,5 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 931,5 \cdot 0,262 \cdot \frac{1}{0,98} = 249,03 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{249,03 \cdot 0,08}{0,175} = 113,84 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{113,84 \cdot 3000}{3600} = 94,87 [W]$$

Silniční kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 96,38 \cdot 9,81 \cdot 0,0157 + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,505 \cdot 1,15 \cdot 8,33^2 = 40,9 \text{ [N]}$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{40,9 \cdot 0,34}{0,021} = 662,19 \text{ [N]}$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:]

$$F_p = 662,19 \cdot 0,22 \cdot \frac{1}{0,98} = 148,65 \text{ [N]}$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{148,65 \cdot 0,095}{0,175} = 80,7 \text{ [N]}$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{80,7 \cdot 3000}{3600} = 67,25 \text{ [W]}$$

4.2 Jízda po rovině konstantní rychlostí 30 km/h proti větru

$v = 30 \text{ [km/h]} = 8,33 \text{ [m/s]}$...rychlost jízdy

$v_{vz} = 3,5 \text{ [m/s]}$...rychlost větru

Horské kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 103,5 \cdot 9,81 \cdot 0,0184 + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,678 \cdot 1,25 \cdot 11,83^2 = 95,36 \text{ [N]}$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{95,36 \cdot 0,345}{0,021} = 1566,63 \text{ [N]}$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 1566,63 \cdot 0,262 \cdot \frac{1}{0,98} = 418,83 \text{ [N]}$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{418,83 \cdot 0,08}{0,175} = 191,47 \text{ [N]}$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{191,47 \cdot 3000}{3600} = 159,56 [W]$$

Silniční kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 96,38 \cdot 9,81 \cdot 0,0157 + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,505 \cdot 1,15 \cdot 11,83^2 = 67,39 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{67,39 \cdot 0,34}{0,021} = 1091,08 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 1091,08 \cdot 0,22 \cdot \frac{1}{0,98} = 244,94 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{244,94 \cdot 0,095}{0,175} = 132,97 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{132,97 \cdot 3000}{3600} = 110,8 [W]$$

4.3 Jízda po rovině konstantní rychlostí 40 km/h

$$v = 40 [km/h] = 11,11 [m/s] \dots \text{rychlost jízdy}$$

Horské kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 103,5 \cdot 9,81 \cdot 0,0184 + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,678 \cdot 1,25 \cdot 11,11^2 = 86,31 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{86,31 \cdot 0,345}{0,021} = 1417,95 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 1417,95 \cdot 0,262 \cdot \frac{1}{0,98} = 379,08 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{379,08 \cdot 0,08}{0,175} = 173,29 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{173,29 \cdot 4000}{3600} = 192,54 [W]$$

Silniční kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 96,38 \cdot 9,81 \cdot 0,0157 + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,505 \cdot 1,15 \cdot 11,11^2 = 55,14 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{55,14 \cdot 0,34}{0,021} = 892,74 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 892,74 \cdot 0,22 \cdot \frac{1}{0,98} = 200,41 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{200,41 \cdot 0,095}{0,175} = 108,79 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{108,79 \cdot 4000}{3600} = 120,88 [W]$$

4.4 Jízda po rovině konstantní rychlostí 40 km/h proti větru

$v = 40 [km/h] = 11,11 [m/s]$...rychlost jízdy

$v_{vz} = 3,5 [m/s]$...rychlost větru

Horské kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 103,5 \cdot 9,81 \cdot 0,0184 + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,678 \cdot 1,25 \cdot 14,61^2 = 135,63 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{135,63 \cdot 0,345}{0,021} = 2228,21 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 2228,21 \cdot 0,262 \cdot \frac{1}{0,98} = 595,71 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{595,71 \cdot 0,08}{0,175} = 272,32 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{272,32 \cdot 4000}{3600} = 302,58 [W]$$

Silniční kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 96,38 \cdot 9,81 \cdot 0,0157 + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,505 \cdot 1,15 \cdot 14,61^2 = 94,99 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{94,99 \cdot 0,34}{0,021} = 1537,93 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 1537,93 \cdot 0,22 \cdot \frac{1}{0,98} = 345,25 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{345,25 \cdot 0,095}{0,175} = 187,42 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{187,42 \cdot 4000}{3600} = 208,24 [W]$$

4.5 Jízda konstantní rychlostí 20 km/h na stoupání 10% proti větru

$v = 20 [km/h] = 5,56 [m/s]$...rychlost jízdy

$\alpha = \tan^{-1} \frac{10}{100} = \tan^{-1} 0,1 = 5,71^\circ$...úhel stoupání

$v_{vz} = 3,5 [m/s]$...rychlost větru

Horské kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 1015,335 \cdot \sin 5,71 + 1015,335 \cdot 0,0184 \cdot \cos 5,71 + \\ + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,678 \cdot 1,25 \cdot 9,06^2 = 164,58 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{164,58 \cdot 0,345}{0,021} = 2703,81 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 2703,81 \cdot 0,262 \cdot \frac{1}{0,98} = 722,86 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{722,86 \cdot 0,08}{0,175} = 330,45 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{330,45 \cdot 2000}{3600} = 183,85 [W]$$

Silniční kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 945,49 \cdot \sin 5,71 + 945,49 \cdot 0,0157 \cdot \cos 5,71 + \\ + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,505 \cdot 1,15 \cdot 9,06^2 = 139,66 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{139,66 \cdot 0,34}{0,021} = 2261,16 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 2261,16 \cdot 0,22 \cdot \frac{1}{0,98} = 507,61 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{507,61 \cdot 0,095}{0,175} = 275,56 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{275,56 \cdot 2000}{3600} = 153,1 [W]$$

4.6 Jízda konstantní rychlostí 30 km/h na stoupání 10% proti větru

$$v = 30 [km/h] = 8,33 [m/s] \dots \text{rychlost jízdy}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{10}{100} = \tan^{-1} 0,1 = 5,71^\circ \dots \text{úhel stoupání}$$

$$v_{vz} = 3,5 [m/s] \dots \text{rychlost větru}$$

Horské kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 1015,335 \cdot \sin 5,71 + 1015,335 \cdot 0,0184 \cdot \cos 5,71 + \\ + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,678 \cdot 1,25 \cdot 11,83^2 = 196,29 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{196,29 \cdot 0,345}{0,021} = 3224,76 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 3224,76 \cdot 0,262 \cdot \frac{1}{0,98} = 862,13 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{862,13 \cdot 0,08}{0,175} = 394,12 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{394,12 \cdot 3000}{3600} = 328,43 [W]$$

Silniční kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 945,49 \cdot \sin 5,71 + 945,49 \cdot 0,0157 \cdot \cos 5,71 + \\ + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,505 \cdot 1,15 \cdot 11,83^2 = 161,39 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{161,39 \cdot 0,34}{0,021} = 2612,98 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 2612,98 \cdot 0,22 \cdot \frac{1}{0,98} = 586,59 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{586,59 \cdot 0,095}{0,175} = 318,43 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{318,43 \cdot 3000}{3600} = 265,36 [W]$$

4.7 Zrychlování na 35 km/h

$a = 0,47 \text{ m/s}^2$... velikost zrychlení

$v = 35 [km/h] = 9,72 [m/s]$... rychlost jízdy

$l = 200 [m]$... ujetá vzdálenost

$t = 43,26 [s]$... doba zrychlování

$J_{horské} = 0,141 [kg \cdot m^2]$... moment setrvačnosti jednoho kola (horské)

$J_{silniční} = 0,0282 [kg \cdot m^2]$... moment setrvačnosti jednoho kola (silniční)

Horské kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 1015,335 \cdot 0,0184 + 103,5 \cdot 0,47 + 0,141 \cdot \frac{0,47}{0,345^2} + \\ + 0,141 \cdot 0,262^2 \cdot \frac{0,47}{0,345^2} + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,678 \cdot 1,25 \cdot 9,72^2 = 119,7 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{119,7 \cdot 0,345}{0,021} = 1966,5 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 1966,5 \cdot 0,262 \cdot \frac{1}{0,98} = 525,74 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{525,74 \cdot 0,08}{0,175} = 240,34 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{240,34 \cdot 100}{20,68} = 1162,19 [W]$$

Silniční kolo:

Síla přivedená na kolo:

$$F_{kolo} = 945,49 \cdot 0,0157 + 96,38 \cdot 0,47 + 0,0282 \cdot \frac{0,47}{0,34^2} + \\ + 0,0282 \cdot 0,22^2 \cdot \frac{0,47}{0,34^2} + \frac{1}{2} \cdot 1,293 \cdot 0,505 \cdot 1,15 \cdot 9,72^2 = 95,73 [N]$$

Síla nutná na kazetě zadního kola:

$$F_{kazeta} = \frac{95,73 \cdot 0,34}{0,021} = 1549,91 [N]$$

Síla přivedená na ozubené kolo převodníku:

$$F_p = 1549,91 \cdot 0,22 \cdot \frac{1}{0,98} = 347,94 [N]$$

Síla působící na pedál:

$$F = \frac{347,94 \cdot 0,095}{0,175} = 188,88 [N]$$

Výkon cyklisty:

$$P = \frac{188,88 \cdot 100}{20,68} = 913,35 [W]$$

5. Technické zhodnocení řešení

V první části své bakalářské práce jsem provedl rozbor pohybové rovnice jízdního kola. Rozborem jednotlivých odporů ovlivňující jízdu jsem získal jednotlivé parametry, které ji přímo. Těmito parametry jsou hmotnost jezdce a kola, úhel sklonu vozovky, součinitel valivého odporu, velikost čelní plochy jezdce sedícího na kole, tvarový součinitel odporu vzduchu, hustota vzduchu, rychlost pohybu cyklisty a rychlost a směr větru, dále hodnota zrychlení, převodového poměru, velikosti poloměru kol a velikosti momentů setrvačnosti kol. Dalším parametrem, kterým jsem se zabýval je poloha těžiště, ta však není pro podélnou dynamiku podstatná.

V druhé kapitole jsem probral možné způsoby měření a zjišťování jednotlivých parametrů. Následně jsem pro vybrané parametry vybral způsob, který jsem použil v následujících kapitolách bakalářské práce. Vybranými parametry je poloha těžiště, velikost čelní plochy, velikost stopy jízdního kola a velikost součinitele odporu valení.

V hlavní části bakalářské práce jsem prováděl měření a výpočty jednotlivých parametrů. Prvním z těchto parametrů je poloha těžiště jízdních kol s jezdce. Polohu těžiště v podélné ose (osa x) jsem získal z rovnosti momentů působících zatíženým kolem na podložku. Pro určení této hodnoty bylo kolo ve vodorovné poloze. U horského kola je těžiště umístěno ve vzdálenosti 0,68 metrů od osy otáčení předního kola. U silničního kola je těžiště umístěno více vpředu než u kola horského, a to ve vzdálenosti 0,636 metrů od osy otáčení předního kola. Posutí vyplývá z rozdílného posedu. Na silničním kole je cyklista totiž více nakloněn nad řídítka. Výšku těžiště jsem určil z momentů při naklonění kola o úhel α . Výška těžiště u horského kola je 1,074 metrů od podložky a u silničního kola 1,122 metrů. Horské kolo má těžiště položené níže, což zajišťuje lepší stabilitu, která je potřebná pro jízdu terénem. U silničního kola je těžiště nepatrně výše, protože poloha posedu je zvětší části zajištěna pozvednutím samotného posedu cyklisty. Pozvednutím posedu lze dosáhnout polohy, kdy je výrazně snížen odpor vzduchu.

Dalším důležitým parametrem ovlivňující jízdu, který jsem určoval je velikost čelní plochy cyklisty sedícího na kole. Velikost čelní plochy ovlivňuje hodnotu odporu vzduchu, který má vedle odporu sklonu vozovky největší vliv na podélnou dynamiku pohybu jízdního kola. Plochu jsem určil tak, že jsem pořídil fotografii čela kola s jezdce. Na této fotografii

se zároveň nacházel čtverec se známým obsahem. Pomocí grafického editoru GIMP jsem jednou barvou vybarvil kolo s jezdcem, druhou čtverec se známým obsahem a zbytek fotografie barvou bílou. Pomocí funkce histogram jsem dostal počty pixelů jednotlivých barev. Díky známému obsahu čtverce a počtu pixelů jsem dopočetl obsah plochy. Pro průměrně vysokého jezdce a horské kolo je čelní plocha rovna $0,678 \text{ m}^2$ a pro silniční kolo pouze $0,505 \text{ m}^2$. Menší plocha u silničního kola je důsledkem posedu cyklisty, a předpokládám, že posed snižuje i hodnotu tvarového součinitele odporu vzduchu c_x , čímž zajišťuje snížení odporu vzduchu.

Jako posledním odporem, kterým jsem se zabýval byl odpor valení. Tento odpor je ovlivněn velikostí stopy kol. Velikost plochy jsem určil tak, že jsem část kola obarvil razítkovacím inkoustem a zabrzděné a zatížené kolo cyklistou jsem obtiskl na papír. Následně jsem postupoval stejně, jako při určování čelní plochy. Výsledkem jsou plochy, které zanechal celý vzorek. Stopy horského kola mají velikost $0,00388 \text{ m}^2$ pro přední kolo o vnitřním tlaku při zatížení $172\,252 \text{ Pa}$, a $0,00488 \text{ m}^2$ pro kolo zadní o vnitřním tlaku při zatížení $141\,855 \text{ Pa}$. Celkový obsah stop obtisknutých vzorkem je potom $0,00876 \text{ m}^2$. Úpravou obtisknutých stop na elipsy jsem získal obsah předního kola $0,00311 \text{ m}^2$ a zadního kola $0,00394 \text{ m}^2$. Celkový obsah stop horského kola jako elips $0,00705 \text{ m}^2$. Obsahy stop obtisknutých silničním kolem je $0,00043 \text{ m}^2$ pro přední o vnitřním tlaku $873\,565 \text{ Pa}$, a $0,000979 \text{ m}^2$ pro zadní kolo o vnitřním tlaku $682\,580 \text{ Pa}$. Celkový obsah stop obtisknutých pláštěm je $0,00141 \text{ m}^2$. Úpravou na elipsy jsem dostal velikost stopy předního kola $0,000477 \text{ m}^2$ a $0,00107 \text{ m}^2$ pro kolo zadní. Celkový obsah stop silničního kola jako elips je $0,00154 \text{ m}^2$. Stopa horského kola je znatelně větší, což je způsobeno tím, že horská kola používají všeobecně širší pláště, a konkrétně v mém případě znatelným podhuštěním, které zajišťuje větší pohodlí při jízdě, lepší stabilitu a průchodnost terénem.

Velikost stopy značně ovlivňuje velikost součinitele odporu valení. Tento součinitel jsem získal z výběhové zkoušky kola. Pomocí zařízení Racelogic jsem naměřil čas a ujetou vzdálenost. Z těchto hodnot jsem vypočítal hodnoty zpomalení. Dalším parametrem, který jsem potřeboval byla hodnota momentu setrvačnosti kol. Momenty setrvačnosti jsem určil experimentálně pomocí metody kyvů. Hodnoty momentů setrvačnosti ostatních rotujících hmot jsem neurčoval, a proto jsem počítal jako kdyby obě kola byla zadní (mají o něco větší moment setrvačnosti). Následně jsem vypočítal hodnoty součinitelů odporu valení pro

jednotlivá měření, ze kterých jsem vypočetl aritmetický průměr. Pro horské kolo jsem získal hodnotu 0,0184 a pro silniční kolo hodnotu 0,0157. Větší součinitel horského kola odpovídá skutečnosti, že stopa horského kola je několikrát větší než silničního. Osobně jsem však očekával větší rozdíl mezi součiniteli bude větší. Za poměrně malý rozdíl jsou pravděpodobně zodpovědná ložiska silničního kola. Životnost ložisek se udává mezi 30 000 až 40 000 kilometry. Vzhledem k tomu, že měřené silniční kolo je 25 let staré s vysokým počtem najetých kilometrů, předpokládám že ložiska nejsou v tak dobrém stavu, jako u pouze dva roky starého kola horského.

V poslední kapitole jsem se zabýval praktickým využitím naměřených parametrů. Jelikož jsem se ve své bakalářské práci podrobně nezabýval odporem vzduchu, tak jsem nezměřil tvarový součinitel odporu vzduchu. Proto jsem vybral hodnotu 1,15 pro kolo silniční a o něco větší hodnotu 1,25 pro kolo horské. Následně jsem mohl vypočítat potřebnou sílu, kterou musí cyklista vyvinout na pedál a potřebný výkon pro různé případy jízdy. Jelikož všechny naměřené parametry ovlivňující odpory jsou pro horské kolo vyšší než pro kolo silniční, musí cyklista působit větší silou a vyvinout vyšší výkon než při jízdě na kole silničním.

Tab. 5 Přehled výsledků

| | Horské kolo | Silniční kolo |
|--|----------------------------|----------------------------|
| Těžiště v ose x (od osy předního kola) | 0,68 [m] | 0,636 [m] |
| Těžiště v ose y | 1,074 [m] | 1,122 [m] |
| Čelní plocha | 0,678 [m ²] | 0,505 [m ²] |
| Tlak v zatíženém předním kola | 172 252 [Pa] | 873 565 [Pa] |
| Tlak v zatíženém zadním kole | 141 855 [Pa] | 682 580 [Pa] |
| Stopa předního kola | 0,00388 [m ²] | 0,00043 [m ²] |
| Stopa zadního kola | 0,00488 [m ²] | 0,000979 [m ²] |
| Celková plocha stop | 0,00876 [m ²] | 0,00141 [m ²] |
| Stopa předního kola (elipsa) | 0,00311 [m ²] | 0,000477 [m ²] |
| Stopa zadního kola (elipsa) | 0,00394 [m ²] | 0,00107 [m ²] |
| Celková plocha stop (elipsa) | 0,00705 [m ²] | 0,00154 [m ²] |
| Moment setrvačnosti kola | 0,141 [kg·m ²] | 0,282 [kg·m ²] |
| Součinitel odporu valení | 0,0184 [–] | 0,0157 [–] |

6. Seznam použité literatury

- [1] Pohyb silničních vozidel [online]. [cit. 2017-11-03].
Dostupné z: https://lms.vsb.cz/pluginfile.php/576460/mod_resource/content/1/2_4.pdf
Sudijní opory. VŠB-TUO.
- [2] *Mechanika styku kolo-vozovka* [online]. [cit. 2017-11-03].
Dostupné z: https://lms.vsb.cz/pluginfile.php/576465/mod_resource/content/1/4_1.pdf
Sudijní opory. VŠB-TUO. [2]
- [3] VLK, František. *Teorie a konstrukce motocyklů 1*. Brno: F. Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7
- [4] VLK, František. *Teorie a konstrukce motocyklů 2*. Brno: F. Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7
- [5] CIBULA, Karel. *Mechanika jízdního kola*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3016-4.
- [6] *Tour de France winners and their average speeds* [online]. [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: http://www.velonews.com/2011/07/news/186088_186088
- [7] Řetězové převody. *Moravian Chains* [online]. [cit. 2017-12-01]. Dostupné z: <http://www.mch-retezy.cz/retezove-prevody/>
- [8] Převodníky. *Shimano europe bike* [online]. [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <https://cycle.shimano-eu.com/>
- [9] Bc. PRACHAŘ, Roman. *Jízdní odpory vozidel* [online]. Brno, 2010 [cit. 2018-01-02].
Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33556.
Diplomová práce. VUT v Brně.
- [10] Boční pohled cyklisty. In: *I-creative.cz* [online]. [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: <http://www.i-creative.cz/2012/03/27/jizdni-kola-omalovanky/>
- [11] Poloha těžiště, CIBULA, Karel. *Mechanika jízdního kola*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3016-4.
- [12] *Měření momentu setrvačnosti* [online]. 2013 [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://nanoed.tul.cz/mod/resource/view.php?id=1851>
- [13] *Součinitel aerodynamického odporu* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.cyclingpowerlab.com/CyclingAerodynamics.aspx>